

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M

MATEUS OTTONELLI DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA ESTANQUEIDADE EM VEDAÇÃO METÁLICA  
DENTADA

Porto Alegre  
2023

MATEUS OTTONELLI DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA ESTANQUEIDADE EM VEDAÇÃO METÁLICA DENTADA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Braga Vieira Lemos

Porto Alegre  
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice-Reitora: Patricia Pranke

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Carla Schwengber ten Caten

Vice-Diretor: Afonso Reguly

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA  
E DE MATERIAIS

Coordenador: Prof. Dr. Rodrigo de Lemos Peroni

Coordenador Substituto: Profa. Dra. Annelise Kopp Alves

#### CIP – Catalogação na Publicação

De Oliveira, Mateus Ottonelli  
ANÁLISE DA ESTANQUEIDADE EM VEDAÇÃO METÁLICA  
DENTADA / Mateus Ottonelli de Oliveira. -- 2023.  
92 f.  
Orientador: Thomas Gabriel Rosauo Clarke.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Vedação metálica. 2. Carregamento combinado. 3. CVU.

I. Clarke, Thomas Gabriel Rosauo, orient. II. Título.

MATEUS OTTONELLI DE OLIVEIRA

ANÁLISE DA ESTANQUEIDADE EM VEDAÇÃO METÁLICA DENTADA

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Bancada Examinadora designada pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Dr. Diego Rizzotto Rossetto - (UTFPR) \_\_\_\_\_

Dr. Diógenes Barbosa Teles - (Micromazza) \_\_\_\_\_

Dr. Guilherme Vieira Braga Lemos - (DEMET/UFRGS) \_\_\_\_\_

Dr. Matheus Freitas Kuhn - (LAMEF/UFRGS) \_\_\_\_\_

## **AGRADECIMENTOS**

Deixo aqui meus agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço a toda minha família, especialmente à minha mãe (Loiva), meu irmão (Lucas), minha segunda mãe (Neca), pelo incondicional apoio e compreensão nos momentos em que estive ausente devido ao desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu Professor orientador Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke pela confiança e oportunidade de participar do programa de pós-graduação do PPGE3M. Ao meu coorientador Prof. Dr. Guilherme Vieira Braga Lemos pela paciência, ajuda e orientações fundamentais que possibilitaram a concretização dessa pesquisa.

Aos colegas do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) em especial para os pertencentes ao grupo PROENG-CDT pelo companheirismo, auxílio nos ensaios experimentais e amizade.

A toda equipe do projeto CVU pelas horas de convivência e ajuda nos momentos chaves da elaboração do trabalho. Ao Dr. Luis Fernando Kanan pela ajuda durante todo o trabalho.

A minha companheira de vida, Anelise, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos e por ter dedicado horas de seu tempo para me ajudar a finalizar essa etapa.

## RESUMO

Vedações metálicas são frequentemente utilizadas na indústria de petróleo e gás devido a sua capacidade de suportar altas pressões e temperaturas, e os ambientes corrosivos aos quais são expostas. Dentre os equipamentos que utilizam tal tipo de vedação está o Conjunto de Vedação Universal (CVU), que faz parte dos Sistemas de Cabeça de Poço Submarina (SCPS). Tais equipamentos realizam a vedação no anular e nas colunas de revestimento, devendo suportar a incidência de um carregamento combinado de esforços, ou seja, esforços axiais (tração e compressão), temperatura e pressões elevadas, com valores na ordem de 1500 kips, 120 °C e 15.000 PSI respectivamente. Nesse contexto, a presente pesquisa buscou compreender melhor a relação desse tipo de carregamento em vedações metálicas. Para isto, foram executados testes em escala reduzida em dois componentes metálicos, em forma de disco, compostos de materiais com durezas distintas - 230 HB, no elemento com perfis triangulares axiais (*wickers*) em sua geometria, e entre 125 e 130 HB no elemento sem perfis (denominados *blanks*). Estes discos metálicos foram submetidos a aplicação de força axial (compressão), por meio de atuador hidráulico, e aplicação de pressão hidrostática, através de compressor hidropneumático. Diferentes geometrias foram testadas, com 2 *wickers*, formando um canal de vedação, e com 4 *wickers*, formando três canais de vedação, possibilitando a avaliação da influência de cada um destes canais. O deslocamento, aferido pelo sensor de deslocamento, foi 47% menor para as pressões de 7500 PSI, e 63% para as pressões de 15000 PSI para os CPs com 4 *wickers*. Pressões menores que 7500 PSI indicaram melhor estanqueidade nos CPs com 2 *wickers*. Por outro lado, para pressões entre 7500 e 12000 PSI, os CPs com 4 *wickers* mostraram-se mais eficientes, resultando em uma melhor vedação metálica.

**Palavras-chave:** Vedação metálica, carregamento combinado, CVU.

## ABSTRACT

Metal seals are often used in the oil and gas industry due to their ability to withstand high pressures and temperatures, and the corrosive environments to which they are exposed. Among the equipment that utilizes this type of sealing is the annular pack-off, which is part of Subsea Wellhead Systems (SWS), and use metal-to-metal seal between their annulus and casing columns. In this application they must withstand combined tensile and compressive axial stress loading, temperature, and high pressures, with values in the order of 1500 kips, 120 °C and 15000 PSI, respectively. This study aims a deeper understanding of how this specific type of loading affects this type of seal. For this, scaled-down tests were conducted on two disc-shaped metallic components, composed of materials with different hardness levels- 230 HB in the element with axial triangular profiles (wickers) in its geometry and from 125 to 130 HB in the element without profiles (called blanks). These metallic discs were compressed axially using a hydraulic actuator and subjected to hydrostatic pressure through a hydro-pneumatic compressor. Different geometries were tested with 2 wickers forming a sealing channel, and with 4 wickers forming three sealing channels. This allowed for the evaluation of the individual influence of each of these channels. The displacement, measured by the LVDT sensor, was 47% lower for pressures of 7500 PSI, and 63% lower for pressures of 15000 PSI for the CPs with 4 wickers. Pressures under 7500 PSI indicated better sealing in the CPs with 2 wickers. On the other hand, pressures between 7500 and 12000 PSI, the CPs with 4 wickers proved to be more efficient, resulting in improved metal sealing.

Keywords: Metal seal, combined loading, annular pack-off.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.1.1.	Objetivo Geral.....	18
1.1.2.	Objetivos Específicos .....	18
1.1.3.	Estrutura da Dissertação .....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	COMPONENTES DE UM POÇO DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO .....	20
2.1.1.	Árvore de Natal Molhada (ANM).....	20
2.1.2.	Tubulações do sistema de produção .....	23
2.1.3.	Manifolds .....	24
2.1.4.	Cabeça de poço ( <i>Wellhead</i> ) .....	25
2.2	CONJUNTO DE VEDAÇÃO UNIVERSAL (CVU) ou <i>PACK-OFF</i> .....	29
2.2.1	Vedação Metálica Tipo <i>Wicker</i> .....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	38
3.1	MATERIAIS .....	38
3.2	MÉTODOS .....	44
3.2.1	Teste Mecânico com Carga Combinada.....	44
3.2.2	Medições da Pressão Hidrostática .....	46
3.2.3	Medições de Deslocamento entre os CPs .....	47
3.2.4	Controle e Registro dos Sinais .....	47
3.2.5	Montagem dos CPs para o Ensaio .....	47
3.2.6	Forças e Pressões aplicadas.....	49
3.2.7	Profundidade de deformação plástica e medição de dureza .....	50
3.2.8	Cálculo da Força Efetiva.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	56
4.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	56
4.1.1.	Diagramas de Comando .....	56
4.1.2.	Diagramas de Resultado .....	61
5	CONCLUSÃO .....	68
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	69
	REFERÊNCIAS .....	70
	ANEXO A - SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	74
	APÊNDICE A.....	84
	APÊNDICE B.....	88

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geração de energia elétrica por fonte.....	15
Figura 2 - Representação esquemática das camadas de exploração do petróleo ....	16
Figura 3 - Classificação das ANMs: a) ANM Horizontal, b) ANM Vertical .....	21
Figura 4 - ANM DO/DA.....	22
Figura 5 - ANM DLL .....	22
Figura 6 - ANM horizontal GLL.....	23
Figura 7 - Principais tipos de roscas de tubos de produção: a) TDS, b) PH-6, c) EU24	
Figura 8 - Utilização de <i>manifold</i> em poços agrupados: a) conjunto de manifolds, b) poços agrupados em um <i>manifold</i> .....	25
Figura 9 - Representação esquemática da BAP e ANM na cabeça de poço submarina .....	27
Figura 10 - Representação de um SCPS para altas pressões e altas temperaturas: a) vista em corte de um SCPS, b) corte em perspectiva de um SCPS .....	27
Figura 11 - Componentes de um Sistema de Cabeça de Poço Submarina. ....	29
Figura 12 - CVU: a) nomenclatura de componentes, b) vista isométrica, c) não energizado, d) energizado.....	31
Figura 13 - Diagramas de energização: a) Carregamento X Deslocamento do anel de energização, b) Pressão média X Profundidade de penetração .....	32
Figura 14 - Deformações causadas em: a) wickers e b) CVU.....	35
Figura 15 - Ampliação da região de wickers do APP e SR.....	35
Figura 16 - Vista em corte de um SCPS: a) indicação dos componentes, b) representação dos carregamentos.....	36
Figura 17 - Vedação de uma superfície em função da força de compressão.....	37
Figura 18 - Fluxograma da metodologia.....	38
Figura 19 - Principais dimensões dos Blanks: a) vista isométrica, b) vista em corte. Dimensões em mm.....	40
Figura 20 - Principais dimensões do CP 2 wickers: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista em corte (seção A-A), d) detalhe perfis triangulares paralelos. 1- Orifícios para passagem de pressão; 2- Perfis triangulares paralelos (wickers); 3- Orifício para entrada de pressão; 4- Orifício para conexão de célula de pressão. Dimensões em mm. ....	40

Figura 21 - Principais dimensões do CP 4 wickers: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista em corte (seção A-A), d) detalhe perfis triangulares paralelo. 1- Orifícios para passagem de pressão; 2- Perfis triangulares paralelos ( <i>wickers</i> ); 3- Orifício para entrada de pressão; 4- Orifício para conexão de célula de pressão. Dimensões em mm. ....	41
Figura 22 - Dimensões do componente “luva”: a) vista isométrica, b) vista superior, c) vista em corte (seção A-A), d) detalhe da furação para fixação do sensor LVDT. 1- Orifício para encaixe do sensor LVDT; 2- Furo roscado para fixação do sensor LVDT; 3- Orifício para encaixe da haste do sensor. Dimensões em mm. ....	42
Figura 23 - Dimensões do centralizador: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista superior. Dimensões em mm.....	43
Figura 24 - Visão geral dos ensaios em escala reduzida .....	44
Figura 25 - Bancada de ensaios em trilhos ferroviários. 1- haste do atuador hidráulico; 2- célula de carga com capacidade de medição de 3000 KN.....	45
Figura 26 - Compressor hidropneumático: a) Vista Frontal, b) Vista lateral .....	45
Figura 27 - Células de pressão instaladas: a) CP (2 wickers), b) CP (4 wickers) com 3 sensores.....	46
Figura 28 - Montagem dos testes: a) corpos de prova, b) 1ª pré montagem, c) 2ª pré montagem, d) arranjo do ensaio. 1- CP Wicker, 2- Centralizador, 3- CP Blank, 4- Luva. ....	48
Figura 29 - Valores de carregamento axial.....	49
Figura 30 - Sequência experimental.....	50
Figura 31 - Aferição das deformações plásticas: a) Blank com 2 marcações (M1 e M2), b) Blank com 4 marcações (M1, M2, M3 e M4), c) relógio comparador .....	51
Figura 32 - Área confinada de aplicação da pressão .....	52
Figura 33 - Canais de vedação para 4 <i>wickers</i> .....	53
Figura 34 - Raios dos diâmetros: a) Corte A-A, b) Corte B-B, c) Seção A-A (2 wickers), d) Seção B-B (4 wickers), e) base dos perfis triangulares paralelos. Dimensões em mm. ....	54
Figura 35 - Gráfico de comando (Força, Pressão X Tempo): a) 2 <i>wickers</i> , b) 4 <i>wickers</i> .....	56
Figura 36 - Patamar de Pressão e Força ampliado: a) 2 <i>wickers</i> b) 4 <i>wickers</i> .....	57
Figura 37 - Compilados de Pressões e Forças: a) 2 <i>wickers</i> b) 4 <i>wickers</i> .....	59

Figura 38 - Diagrama de resultado (Força Efetiva, Pressão X Deslocamento) 2 <i>wickers</i> .....	62
Figura 39 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) 2 <i>wickers</i> .....	62
Figura 40 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) 4 <i>wickers</i> .....	63
Figura 41 - Comparação entre Força Efetiva Total e Força Efetiva 2.....	64
Figura 42 - Gráficos Comparativos: a) 2 <i>wickers</i> b) 4 <i>wickers</i> .....	64
Figura 43 - Gráficos, a) Força Efetiva X Tempo, b) Força por Pressão X Tempo, ....	66
Figura 44 - Refino de malha: a) Blank, b) 2 <i>wickers</i> , c) 4 <i>wickers</i> , d) montagem .....	75
Figura 45 - Diagramas de convergência de malha: a) Erro (%) X tamanho de elemento, b) Erro (%) X número de elementos .....	76
Figura 46 - Condições de contorno .....	77
Figura 47 - CP's, água e região confinada .....	78
Figura 48 - Profundidades de penetração: a) 2 <i>wickers</i> , b) 4 <i>wickers</i> .....	80
Figura 49 -Comparativo de resultados: a) 2 <i>wickers</i> , b) 4 <i>wickers</i> .....	81
Figura 50 - Pressão de contato para os cravamentos máximos: a) 2 <i>wickers</i> , b) 4 <i>wickers</i> .....	83
Figura 51 - Montagem do experimento e registro do aperto. 1- Torquímetro, .....	84
Figura 52 - Experimentos práticos iniciais em escala reduzida: a) experimento prático, b) vista em corte dos componentes, c) exemplificação do modelo numérico. 1- <i>wickers</i> , 2- Blank, 3- Capa Célula de Carga (CC). .....	85
Figura 53 - Malha utilizadas no modelo numérico: a) componentes da montagem, b) condição de união entre <i>cabeça</i> ↔ <i>corpo do parafuso</i> e <i>corpo do parafuso</i> ↔ <i>porca</i> , c) deformação para representar a tensão do parafuso, d) superfícies de contato. 1- Cabeça do parafuso, 2- Arruela, 3- Célula de Carga (CC), 4- Blank, 5- <i>wickers</i> , 6- Corpo do parafuso, 7- Porca. ....	86
Figura 54 - Profundidade de penetração do modelo numérico.....	87
Figura 55 - Gráfico de comando (Força, Pressão X Tempo) para 2 <i>wickers</i> : a) 201, b) 202, c) 203, d) 204 .....	88
Figura 56 - Gráfico de comando (Força, Pressão X Tempo) para 4 <i>wickers</i> : a) 301, b) 302, c) 304, d) 305 .....	90
Figura 57 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) - 2 <i>wickers</i> : a) 201, b) 202, c) 203, d) 204 .....	92

Figura 58 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) - 4  
wickers: a) 301, b) 302, c) 304, d) 305 .....94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores característicos da atividade offshore .....	17
Tabela 2 - Classificação das ANMs.....	21
Tabela 3 - Nomenclatura e funções dos equipamentos de uma cabeça de poço submarina.....	28
Tabela 4 - Quantidade de CPs utilizada.....	39
Tabela 5 - Células de Pressão CPs de 4 <i>wickers</i> .....	46
Tabela 6- Etapas de montagem dos ensaios .....	47
Tabela 7 - Unidades de P, F e A .....	52
Tabela 8 - Equações para cálculo da força de pressão .....	53
Tabela 9- Valores Força e Pressão .....	60
Tabela 10 - Propriedades mecânicas.....	74
Tabela 11 - Malha de elementos .....	75
Tabela 12 - Etapas do modelo .....	77
Tabela 13 - Propriedades consideradas para água.....	78
Tabela 14 - Correlação de medidas .....	79
Tabela 15 - Comparativo numérico e experimental da profundidade de penetração residual - 2 <i>wickers</i> .....	79
Tabela 16 - Comparativo numérico e experimental da profundidade de penetração residual - 4 <i>wickers</i> .....	79
Tabela 17 - Força aplicada e pressão de vazamento por patamar .....	81
Tabela 18 - Condições e respostas do ensaio experimental.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
BAP	Base Adaptadora de Produção
BOP	Conjunto de Prevenção de Explosões ( <i>Blowout Preventer</i> )
CP	Corpo de Prova
CPs	Corpos de Prova
FPSO	Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência <i>Floating Production Storage and Offloading</i> )
HB	Dureza <i>Brinell</i> ( <i>Hardness Brinell</i> )
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LVDT	Transdutor Diferencial Linear de Variável ( <i>Linear Variable Differential Transformer</i> )
MEF	Método dos Elementos Finitos ( <i>Finite Element Method</i> )
PSI	Libra-força por polegada quadrada ( <i>Pound-Force per Square Inch</i> )
ROV	Veículo de Operação Remota ( <i>Remotely Operated Vehicle</i> )
RP	Ponto de Referência ( <i>Reference Point</i> )
SC	Suspensor de Coluna ( <i>Tubing Hanger - TH</i> )
SCPS	Sistema de Cabeça de Poço Submarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varnothing_i$	Diâmetro $i$ ( $\varnothing_A, \varnothing_B, \varnothing_C, \varnothing_D, \varnothing_E, \varnothing_F$ ) [mm]
$\mu\text{m}$	Micrômetros [ $10^{-6}\text{m}$ ]
$A$	Área [ $\text{mm}^2$ ]
$E$	Módulo de elasticidade
$F$	Força [N]
$FE$	Força Efetiva [kN]
GPa	Gigapascal [ $10^9 \text{N/m}^2$ ]
$K$	Módulo volumétrico
$kN$	<i>kilo-Newton</i> [ $10^3\text{N}$ ]
Lb	Libras
mm	Milímetros
MPa	Megapascal [ $10^6 \text{N/m}^2$ ]
$P$	Pressão [PSI]
Pol	Polegada
PSI	Libras por polegada quadrada ( <i>Pounds per Square Inch</i> ) [ $\text{lb/pol}^2$ ]
$R_i$	Raio $i$ ( $R_A, R_B, R_C, R_D, R_E, R_F$ ) [mm]
$\pi$	Pi $\approx 3,1416$ (perímetro/diâmetro) [mm]
$\nu$	Coefficiente de Poisson

## 1 INTRODUÇÃO

Vedações são dispositivos essenciais na engenharia, pois possuem a função crucial de conter um determinado fluido, seja por meio do fechamento de um orifício existente na sua passagem, seja por sua aplicação em junções com níveis de estanqueidade adequados em suas utilizações. A seleção do melhor tipo de vedação para uma determinada aplicação pode ser uma tarefa difícil dada a variedade de classes, dimensões (podendo ter de milímetros até metros de comprimento) e custos associados (FLITNEY, 2014).

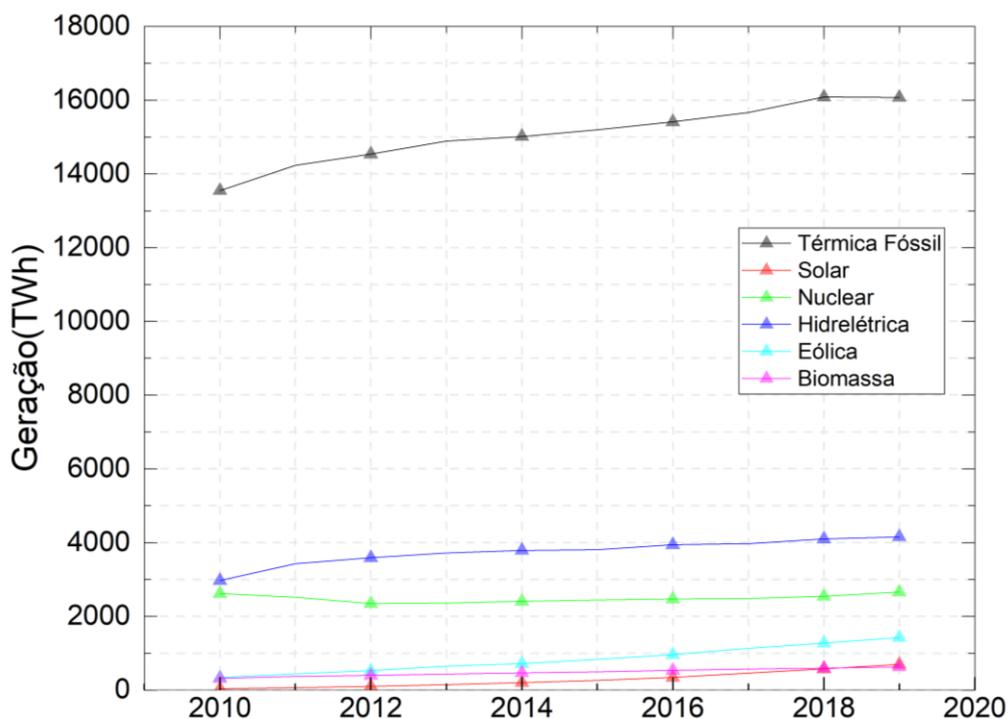
Dentre as aplicações de engenharia que necessitam de dispositivos com vedações estanques, está a indústria de óleo e gás. A medida em que a exploração é executada em maiores profundidades, com a ocorrência de altas temperaturas e altas pressões, vedações elastoméricas podem sofrer avarias durante a produção ou na recuperação dos componentes instalados nos poços (DORT, 2009). Devido a estas características de operação, vedações metálicas (*metal to metal seal*) são as mais utilizadas na indústria de óleo e gás, pois são capazes de operar em tais ambientes. Em cabeças de poços para altas pressões a vedação acontece por meio de deformações plásticas devido as cargas que são aplicadas (XIAO, 2015).

Uma das mais importantes utilizações dos produtos da indústria de óleo e gás é a geração de energia para consumo antrópico. Atualmente a matriz energética mundial é composta principalmente por fontes não renováveis de energia (cerca de 86%), onde a participação do petróleo e seus derivados é de 31,1% e do gás natural de 23% (IEA, 2021). A Figura 1 apresenta o crescimento da geração de energia elétrica conforme diferentes fontes, com destaque para o uso de fonte térmica fóssil até o ano de 2019, sendo sua participação 2,5 vezes maior do que a hidrelétrica (a segunda mais utilizada para geração de energia elétrica). Nota-se assim o quão importante é a participação da fonte de energia térmica fóssil na geração de eletricidade para utilização antrópica.

Energia possui, usualmente, a definição de ser a capacidade que um corpo, uma substância ou um sistema físico têm de realizar trabalho (HOUAISS, 2009). A obtenção de energia térmica é realizada por meio da oxidação térmica (combustão) de diversas fontes de origem química, tais como: petróleo, carvão, gás natural e biomassa (STRAPASSON, 2004). No Brasil, a geração elétrica a partir de fontes não

renováveis, no ano de 2022, representou 22,6% do total nacional, contra 16,8% em 2020. Deste valor, cerca de 60,5% provêm de energia gerada por petróleo e seus derivados, evidenciando que tais fontes ainda representam uma fração vultuosa na matriz energética nacional (BEN, 2022).

Figura 1 - Geração de energia elétrica por fonte



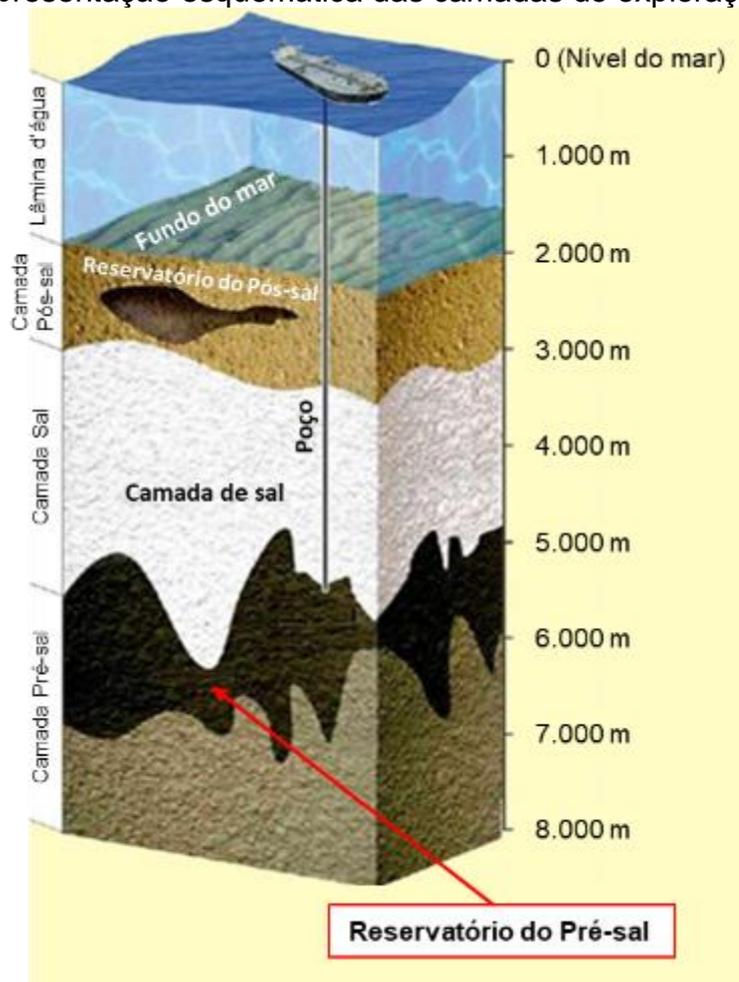
Fonte: Adaptado de IEA (2021)

Em 2021 a produção de petróleo atingiu a média de 2,9 milhões de barris diários, onde 97% desta quantidade é de origem marítima (*offshore*), sendo o Rio de Janeiro o estado que mais contribuiu para tal produção - 80,6% do montante anual (BEN, 2022). Neste mesmo ano, o Brasil confirmou a existência de reservas de petróleo equivalentes a 13,2 bilhões de barris, sendo que 96% deste total originou-se das Bacias de Campos e de Santos, ou seja, de águas profundas e ultra profundas. A produção de petróleo originária destas águas representa cerca de 95% da produção total brasileira (IBP 2022).

Conforme Petrobras (RIMA, 2011), os reservatórios do Pré-Sal estão localizados a uma profundidade de 5 mil metros abaixo do nível do mar e sob uma camada de sal capaz de atingir 2 mil metros de espessura. Tal camada possui a função de rocha selante, ou seja, um obstáculo que impede a fuga do gás natural e

do petróleo dos reservatórios, favorecendo assim a sua acumulação. A camada do Sal está sob um depósito sedimentar que contém os reservatórios denominados de Pós-sal. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática de tais camadas e suas respectivas profundidades.

Figura 2 - Representação esquemática das camadas de exploração do petróleo



Fonte: Adaptado de Petrobras (RIMA, 2011)

Observando a Figura 2, é possível pressupor que as atividades de exploração e produção de petróleo em águas profundas e ultra profundas (mais de 2.000 metros de profundidade) envolvem grandes desafios tecnológicos, decorrentes das condições de operação que essas profundidades impõem aos equipamentos de exploração e produção. Estes desafios levam ao desenvolvimento de novas tecnologias e inovações, a fim de possibilitar o avanço nas explorações. O alto grau de dificuldade técnica que difere a atividade offshore dos demais setores da economia

acontece devido a três grandes fatores característicos (RIMA, 2011; MORAIS, 2013). A Tabela 1 apresenta exemplos de fatores e possíveis inovações tecnológicas.

Tabela 1 - Fatores característicos da atividade offshore

Fator	Exemplos do fator	Algumas inovações tecnológicas impostas por tal fator
Condições do clima, do ambiente marinho e das rochas abaixo do leito oceânico	Altura das ondas, velocidade dos ventos, direções das correntes marítimas, pressões hidrostáticas (devido à coluna d'água), baixas temperaturas do fundo do mar, condições estruturais do solo marinho, porosidade e constituição das rochas marinhas.	Isolamento térmico nos dutos que conduzem petróleo e gás natural dos poços até a plataforma; Obtenção de materiais resistentes a fadigas para evitar rupturas nos cabos de ancoragem; Desenvolvimento de cabos sintéticos leves para amarração e ancoragem em plataformas semissubmersíveis de perfuração.
Grandes distâncias marítimas	Distância entre os poços de exploração e a plataforma de produção (cerca de 10.000 metros), distância entre as plataformas de produção e plataformas de estocagem e distância destas plataformas até a costa marítima (em torno de 300 quilômetros nas áreas do Pré-sal brasileiro).	Meios de controle remoto e intervenções a distância em operações de montagem de equipamentos nos poços e no solo marinho; Desenvolvimento de linhas de fluxo, risers e equipamentos para águas profundas (colunas d'água de até 3.000 metros); Potentes sistemas de bombeamento para a extração de petróleo dos poços e sua condução até a plataforma.
Invisibilidade das operações marítimas	Devido as grandes profundidades que as atividades de exploração são executadas, a visibilidade das operações só é possibilitada por meio de iluminação artificial oriunda de equipamentos específicos.	A utilização de ROVs (Veículos de Operação Remota, do inglês <i>Remotely Operated Vehicle</i> ) se torna essencial para viabilização das atividades de produção. Após 300 metros de profundidade, a iluminação artificial não é mais realizada por meio de mergulhadores, onde a única forma de execução de atividades de inspeção, monitoramento e intervenção é por meio de ROVs.

Fonte: Morais (2013).

Outros dois fatores relevantes para a criação de novas tecnologias são decorrentes das características do petróleo como alta viscosidade e presença de contaminantes em sua constituição. Embora tais características também existam na

produção *onshore* (desenvolvida no solo, acima de uma reserva subterrânea), estas são mais severas na produção *offshore* (MORAIS, 2013). Diante do exposto acima e da importância da atividade de exploração e produção de petróleo para a manutenção das atividades humanas, é possível presumir as dificuldades de operar em águas profundas e ultra profundas.

Neste contexto, o trabalho em questão pretende ampliar o conhecimento acerca dos fenômenos aos quais os equipamentos de sistemas de cabeças de poços submarinos (SCPS) são submetidos, em especial, como a vedação de perfis triangulares paralelos (*wickers*) se comporta sobre a influência de carregamento combinado (força axial e pressão). O comportamento de tais componentes sob este tipo de esforço ainda não foi estudado especificamente, sendo uma lacuna a ser preenchida na literatura.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral avaliar a variação nas deformações e a estanqueidade das geometrias analisadas com distintos materiais através de ensaios mecânicos.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

Foram estabelecidos como objetivos específicos:

- Determinar a força de compressão, os valores de Força Efetiva (CP com 2 *wickers*) e Força Efetiva Total (CP com 4 *wickers*) necessários para promover estanqueidade em pressões de 7500 PSI e 15000 PSI nas duas configurações de corpos de prova;
- Determinar qual a melhor configuração de CP para determinada faixa de pressão.

### **1.1.3. Estrutura da Dissertação**

O trabalho em questão encontra-se dividido em seis capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução e os objetivos (geral e específicos). No Capítulo 2, é realizada uma revisão da literatura dos assuntos abordados neste trabalho. No Capítulo 3, os ensaios experimentais são expostos de forma detalhada com a descrição dos materiais utilizados e seus métodos. O Capítulo 4 consiste na apresentação, análise e discussão dos resultados obtidos após a realização dos experimentos.

As conclusões obtidas dessa pesquisa serão expostas no Capítulo 5. E por fim, as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6. A pesquisa ainda conta com o Anexo A, que apresenta a simulação numérica desenvolvida para os experimentos realizados, o Apêndice A mostrando a versão preliminar do experimento prático, e o Apêndice B, que apresenta os digramas gerados com os ensaios.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, uma breve revisão bibliográfica é apresentada, incluindo aspectos gerais que facilitem o entendimento dos conteúdos para o desenvolvimento do trabalho.

### 2.1 COMPONENTES DE UM POÇO DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO

Um sistema submarino de produção é composto por alguns equipamentos principais, dependendo de seu tipo de completação. Tal termo é definido como “conjunto de operações destinadas a equipar o poço para a produção de óleo ou gás, bem como para injeção de fluidos no reservatório” (VILLELA, 2004). A completação pode ser de duas formas distintas, sendo elas: completação seca (sistema de cabeça de poço posicionado na superfície) e completação molhada (sistema de cabeça de poço posicionado no fundo do mar) (VILLELA, 2004; FRANCISS e SILVA, 2019).

O presente trabalho focará em equipamentos utilizados em sistemas de produção com completação molhada. Neste contexto, o poço do sistema submarino de produção possui os seguintes equipamentos: Árvore de Natal Molhada (ANM)<sup>1</sup>, tubulações do sistema de produção, cabeça de poço (*Wellhead*) e, em alguns casos, *manifolds* (VILLELA, 2004). Esses componentes serão descritos brevemente nas seções a seguir.

#### 2.1.1. Árvore de Natal Molhada (ANM)

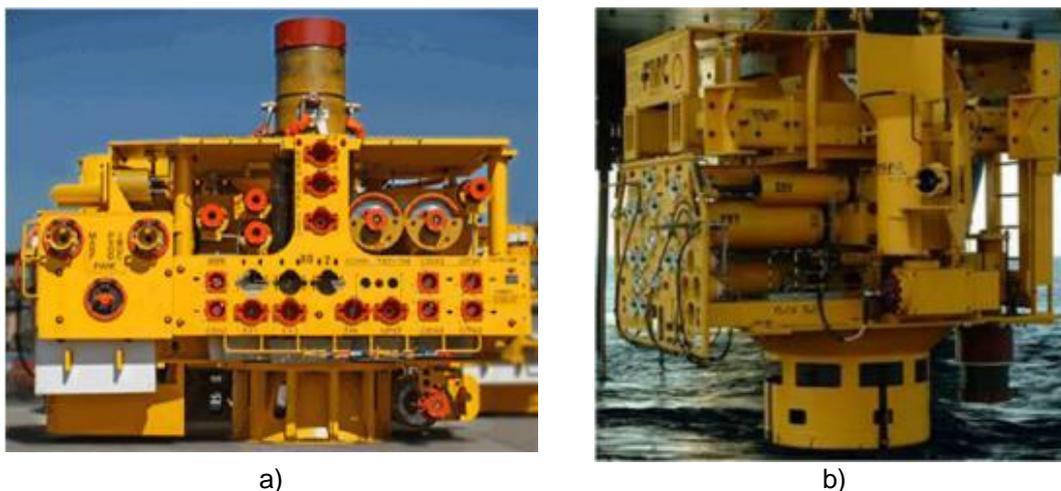
De acordo com Bai e Bai (2019), as ANMs são consideradas um dos equipamentos mais importantes em um sistema de produção submarino. Estes componentes consistem, basicamente, em um conjunto de válvulas instaladas na cabeça de poço com o objetivo de fornecer uma interface de controle entre o poço e demais equipamentos de produção. Ainda segundo Bai e Bai (2019), as ANMs podem ser classificadas de acordo com o arranjo estrutural de suas válvulas em ANM Verticais e ANM Horizontais. Vasconcelos (2015) indica que as ANM Horizontais são

---

<sup>1</sup> O equipamento Árvore de Natal pode ser: Molhada (Árvore de Natal Molhada - ANM) - quando instalada no leito oceânico na cabeça do poço - ou Seca, quando é instalada no topo do duto de produção (*Riser*) (Villela, 2004).

aquelas onde a saída de produção ocorre lateralmente e possuem um bloco lateral em sua construção onde estão localizadas as válvulas mestras. Já as ANM Verticais, as mais utilizadas no Brasil, possuem todas as suas válvulas mestras acima do Suspensor de Coluna (SC) ou *Tubing Hanger* (TH). As Figuras 3(a) e 3(b) exemplificam esta classificação.

Figura 3 - Classificação das ANMs: a) ANM Horizontal, b) ANM Vertical



Fonte: BAI e BAI (2019)

As ANMs são equipamentos responsáveis por permitir o controle do poço de produção ou de injeção. Para isso, este componente é instalado no leito oceânico e é constituído por conjuntos de válvulas do tipo gaveta, linhas de fluxo e sistema de controle localizado na plataforma de produção (THOMAS, 2001; VILLELA, 2004). A Tabela 2 apresenta as classificações utilizadas para as ANMs, de acordo com o modo de instalação e conexão das linhas de produção e controle.

Tabela 2 - Classificação das ANMs

Classificação <sup>2</sup>	Características
ANM-DO	Utilizadas para poços ou campos marginais de no máximo 200 metros de profundidade. A conexão das linhas de fluxo e controle e operação das válvulas manuais podem ser realizadas por mergulhadores.

<sup>2</sup> De acordo com Thomas (2001): DO - Operadas por mergulhador (*Diver Operated*); DA - Assistida por mergulhador (*Diver Assisted*); DL - Operada sem mergulhador (*Diverless*); DLL - Operada sem mergulhador (*Diverless Lay-away*); GLL - Operada sem mergulhador e sem cabos guia (*Diverless Guidelineless*).

Tabela 2 - Classificação das ANMs

Classificação	Características
ANM-DA	Utilizadas em poços com profundidades de até 300 metros. Não possuem válvulas manuais, mergulhadores são utilizados para realizar a conexão das linhas de fluxo e controle.
ANM-DL	Destinadas para poços com profundidades máximas de 400 metros. São operadas sem mergulhadores, por meio de ferramentas ou conectores hidráulicos que realizam todas conexões e acoplamentos. Estas ANMs podem ser consideradas as precursoras das ANMs DLL e GLL.
ANM-DLL	Tais equipamentos são conduzidos até o leito oceânico com as conexões de linha de fluxo e de controle conectadas na ANM ou em uma Base Adaptadora de Produção (BAP), a qual é instalada anteriormente a ANM. A classificação <i>lay-away</i> se dá pelo fato de que a descida da ANM ou da BAP é realizada juntamente com as linhas de controle e de fluxo lançadas pela embarcação de lançamento de linhas. Tais ANMs possuem interface para operação com ROVs.
ANM-GLL	Utilizadas em poços com mais de 500 metros de profundidade. Estes equipamentos também utilizam BAP, e o acoplamento da ANM é realizado mediante grandes funis, por meio de rasgos e chavetas, tendo em vista que a cabeça de poço não utiliza cabos-guia.

Fonte: Adaptado de Thomas (2001)

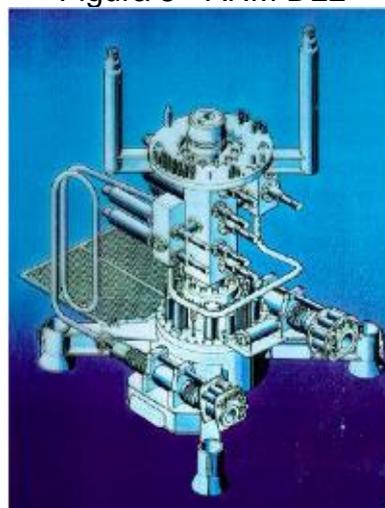
As Figuras 4, 5 e 6 apresentam exemplos de ANMs, do tipo *DO/DA*, *DLL* e horizontal do tipo *GLL*. As ANMs, juntamente com as cabeças de poço (*wellhead*), são um dos principais equipamentos de um sistema submarino de produção. O item 2.1.4, abordará de forma mais detalhada as cabeças de poço.

Figura 4 - ANM DO/DA



Fonte: Nordeste (2022)

Figura 5 - ANM DLL



Fonte: Vasconcelos (2015)

Figura 6 - ANM horizontal GLL



Fonte: Schlumberger (2022)

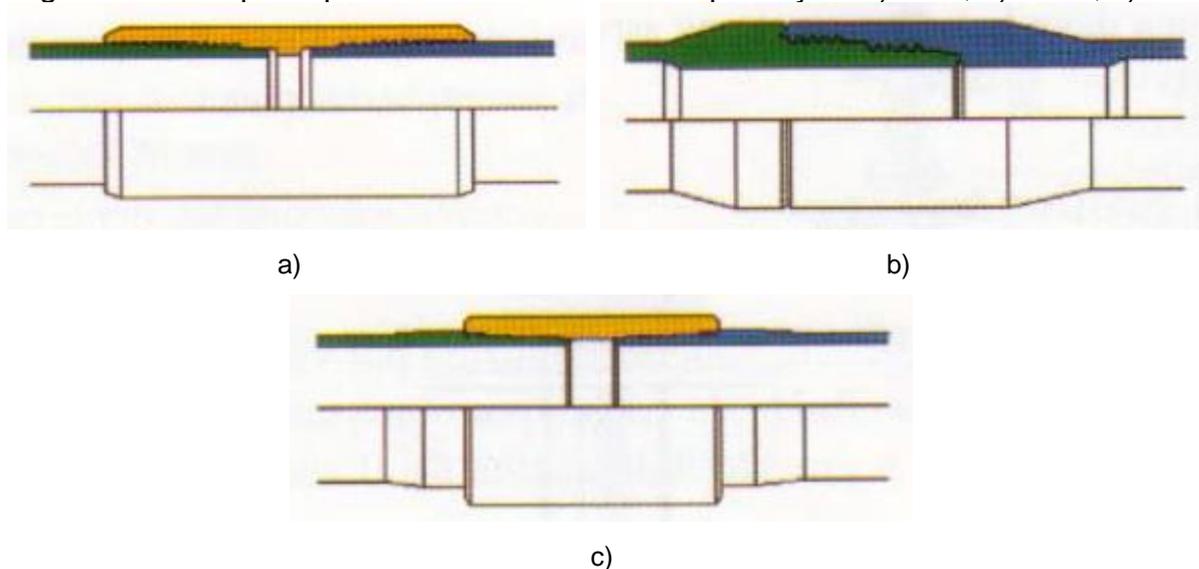
### 2.1.2. Tubulações do sistema de produção

As tubulações dos sistemas de produção possuem a função de conduzir o fluido do poço de produção para a ANM, ou da ANM novamente para o poço, no caso de injeção. Estes dispositivos são fabricados sem costura, isto é, não são utilizados processos de soldagem para união de segmentos (SILVA e FRANCISS, 2019).

De acordo com Thomas (2001), tais tubulações possuem o maior custo dentre os equipamentos de superfície e compõem os componentes básicos de uma coluna de produção. A seleção de tubulações, dentre todos os modelos existentes no mercado, leva em consideração fatores como o diâmetro interno do revestimento de produção, a vazão, o fluido da produção e os esforços a que tais tubos serão submetidos durante a exploração. Os esforços envolvem tensões de tração, pressão interna e tensões de colapso, sendo os principais fatores considerados na determinação da espessura da parede e o grau do aço das tubulações.

Estes componentes necessitam ser estanques, para isso possuem conexões com roscas finas que exercem a função de realizar a vedação metal-metal (THOMAS, 2001). A Figura 7 apresenta os principais tipos de roscas utilizadas em tubos de produção.

Figura 7 - Principais tipos de roscas de tubos de produção: a) TDS, b) PH-6, c) EU



Fonte: Adaptado de Thomas (2001)

As roscas são selecionadas de acordo com as características de cada poço, onde a TDS (Figura 7(a)) é utilizada em poços de gás ou com gases corrosivos, como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ . A rosca do tipo PH-6 (Figura 7(b)) é utilizada em poços profundos de alta pressão com gases corrosivos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ). Por fim, para poços de óleo é utilizada a rosca EU (Figura 7(c)) (THOMAS, 2001). Estas roscas realizam a vedação metal-metal em tubos de produção, contudo existem outros componentes de um sistema de produção submarino que utilizam este tipo de vedação. O item “2.2.1 Vedação Metálica Tipo Wicker” abordará este tema de forma mais detalhada.

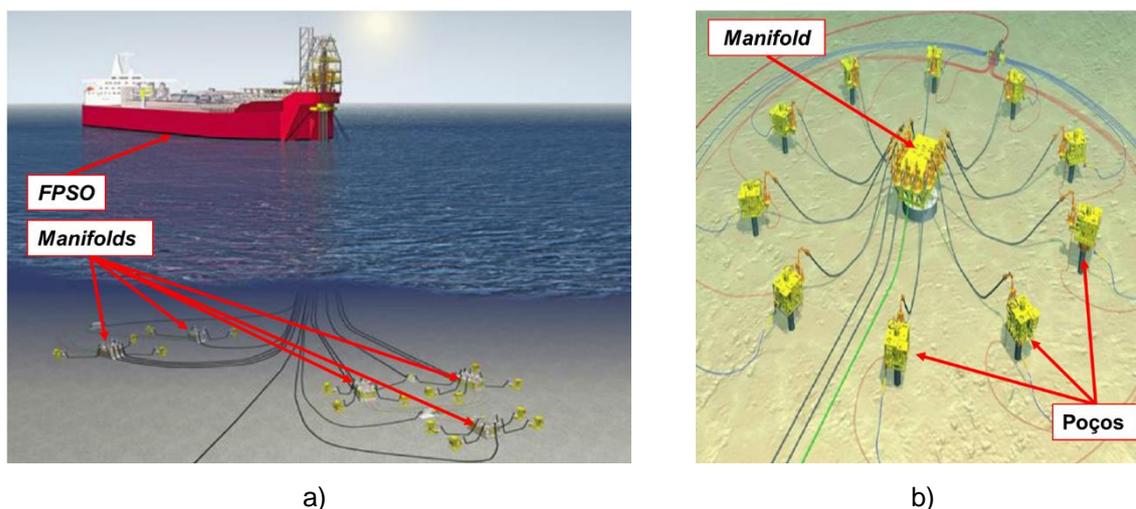
### 2.1.3. Manifolds

Os *manifolds* são equipamentos compostos por um arranjo de tubulações e válvulas com função de combinar, distribuir, controlar e monitorar o escoamento de fluidos. Estes dispositivos têm sido utilizados no desenvolvimento de campos de óleo e gás, buscando simplificar o sistema submarino de produção, minimizar a utilização de tubulações submarinas e *Riser*<sup>3</sup>, e otimizar o escoamento do fluido no sistema de

<sup>3</sup> Denomina-se *Riser* o trecho da tubulação que realiza a conexão da unidade flutuante ao equipamento instalado no leito oceânico, e possuem a função de transportar óleo, água, gás ou misturas. Podem ser rígidos ou flexíveis e representam uma fração importante dos custos totais dos campos de exploração (FROUFE, 2004).

produção (BAI e BAI, 2019). A Figura 8 apresenta este equipamento na produção de vários poços, quando estes estão localizados a distâncias de até dezenas de metros (UMOFIA, 2014).

Figura 8 - Utilização de *manifold* em poços agrupados: a) conjunto de manifolds, b) poços agrupados em um *manifold*



Fonte: Adaptado de Umofia (2014)

A Figura 8 (a) apresenta a utilização de *manifolds* para formar conjuntos de poços que são ligados diretamente a Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência (FPSO). A Figura 8 (b) representa um *manifold* formando conjuntos de poços no leito marinho.

Assim como as plataformas de produção, estes equipamentos possuem limitações quanto ao número máximo de poços interconectados, a profundidade e pressão de operação e a vazão da produção. A interação entre os reservatórios, poços e o sistema submarino de produção possui grande influência na produção dos poços e no acumulado de produção dos campos (ROSA, 2017).

#### 2.1.4. Cabeça de poço (*Wellhead*)

Definida como uma parte crucial do sistema de perfuração e de produção, a cabeça de poço tem a função de fornecer resistência estrutural e ser a interface de contenção de pressão nos equipamentos de perfuração e produção. O sistema de cabeça de poço por si só é bastante complexo, contendo inúmeros subsistemas e componentes. Além disso, possui distintas funções durante as fases de perfuração e

produção. Alguns componentes do sistema de cabeça de poço submarino são a única barreira física entre o fluido extraído do poço e o ambiente marinho, exigindo que o projeto deste sistema seja seguro e bem dimensionado (KACULI *et al.*, 2014).

As cabeças de poço servem como ponto de entrada para colunas de revestimento e para a tubulação de produção, sendo o conjunto de equipamentos onde o poço encontra a superfície do leito marinho. Estes componentes fazem a sustentação e vedação das colunas de revestimento, além de servir como suporte ao conjunto de prevenção de explosões (do inglês *Blowout Preventer* - BOP<sup>4</sup>) durante a etapa de perfuração e à árvore de natal molhada após a conclusão do poço. Entretanto, sua principal função é dar a rigidez estrutural para os sistemas de perfuração e conclusão, além de conter a pressão no leito marinho e nas colunas de revestimento dentro do poço de produção (BAI e BAI, 2019).

Ademais, tal sistema possui perfis internos com o objetivo de suportar as colunas de revestimento e isolar o anular, espaço vazio entre o revestimento de produção e a coluna de produção ou entre as paredes do poço e a coluna de perfuração (BARCELOS, 2017).

No Brasil, a PETROBRAS utiliza dois equipamentos instalados na cabeça de poço submarina, sendo a base adaptadora de produção e a árvore de natal molhada (AGOSTINI *et al.*, 2017), a Figura 9 traz uma representação esquemática desta configuração de produção.

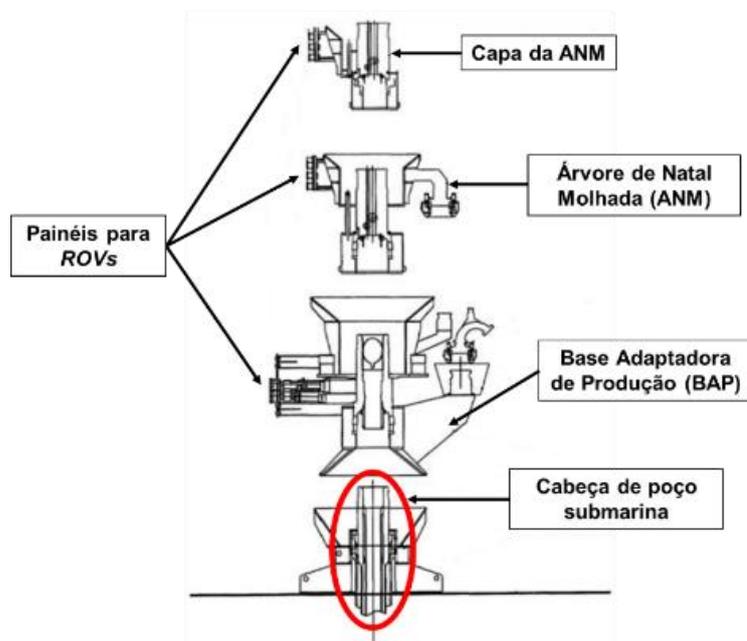
Conforme mencionado, a cabeça de poço é composta por uma série de equipamentos de diferentes geometrias e desempenham funções distintas. A Figura 10 apresenta os componentes de uma cabeça de poço para altas pressões e temperaturas (*high pressure / high temperature Wellhead*) instalados no Alojador de Alta Pressão (AAP).

A Tabela 3 contém a nomenclatura e as principais funções de tais componentes, sendo que o item 2 será apresentado de forma mais detalhada no tópico “2.2 CONJUNTO DE VEDAÇÃO UNIVERSAL (CVU)”. A Figura 11, mostra os componentes do sistema separadamente.

---

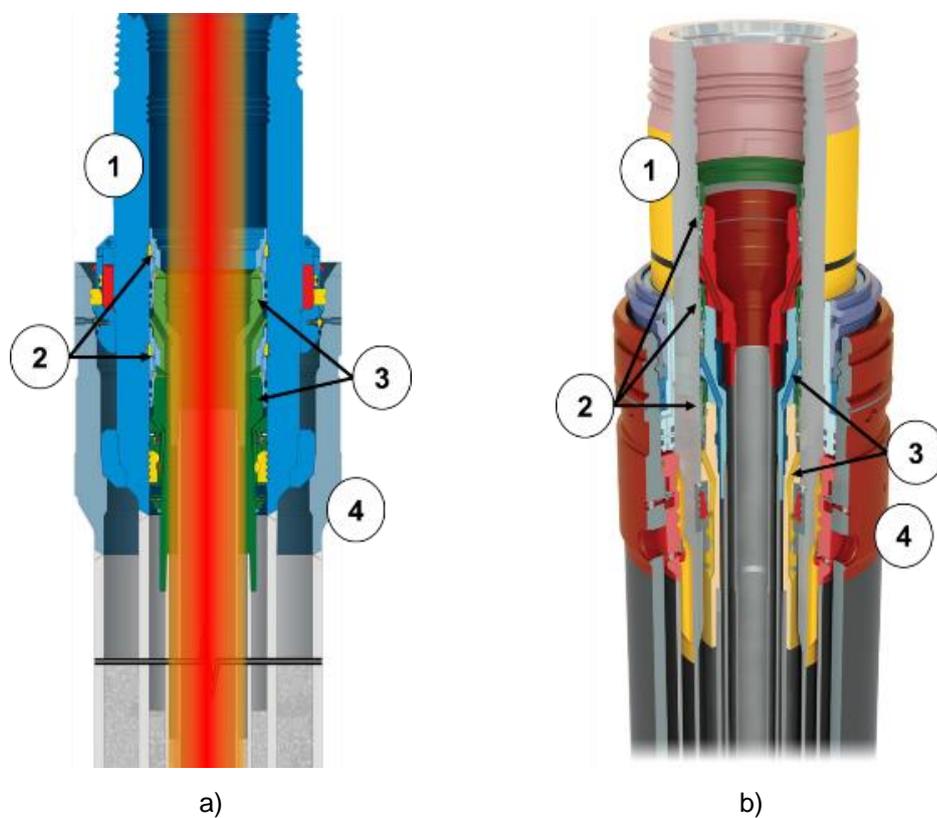
<sup>4</sup> Equipamento instalado durante a operação de perfuração, composto por uma série de válvulas que possuem a função de selar o poço, ou seja, fechar a coluna caso ocorram *kick* (fluxo indevido de fluido contido no poço), prevenindo a ocorrência de explosão “*blowout*”, sendo um componente de segurança essencial para as atividades de perfuração (THOMAS, 2001).

Figura 9 - Representação esquemática da BAP e ANM na cabeça de poço submarina



Fonte: Adaptado de Agostini *et al.* (2017)

Figura 10 - Representação de um SCPS para altas pressões e altas temperaturas:  
a) vista em corte de um SCPS, b) corte em perspectiva de um SCPS



Fonte: adaptado de Brown e Witwer (2017)

Fonte: adaptado de TechnipFMC (2018)

Tabela 3 - Nomenclatura e funções dos equipamentos de uma cabeça de poço submarina

Item	Nomenclatura	Principais Funções
1	Alojador de Alta Pressão (AAP) - <i>High-Pressure Housing</i>	Geralmente possui o diâmetro interno de 18 ¾ polegadas, sendo um componente inteiriço da cabeça de poço submarina, não permitindo acesso ao anular. Proporciona uma interface entre o sistema de BOP e o poço submarino, fornecendo apoio para cada coluna de revestimento, e após a energização do CVU em torno do suspensor de revestimento possuirá uma vedação metálica. O diâmetro interno mínimo de um AAP deve permitir a passagem de uma broca de perfuração de 17 ½ pol. Possui ombros de carga que servem para o assentamento no leito marinho e geralmente acomoda dois ou três suspensores de revestimento e um suspensor de coluna. Possui 3 posições para posicionamento do CVU.
2	Conjunto de Vedação Universal (CVU) - <i>Metal to Metal Seal (Pack-off)</i>	
3	Suspensor de Revestimento (SR) - <i>Casing Hanger</i>	O SR proporciona uma área de vedação metálica para o CVU, vedando o espaço anular entre SR e AAP. Cada SR possui ranhuras permitindo a passagem do fluido pelo <i>Raiser</i> de perfuração e pela pilha BOP. Os SRs são alocados verticalmente, de modo que todas as cargas de revestimento são transferidas para o ombro de carga do AAP presente na parte inferior da cabeça de poço.
4	Alojador de Baixa Pressão - <i>Low Pressure Housing</i>	Consiste em um ponto para a base-guia de perfuração, e provê uma interface com o AAP. Esse componente requer uma correta cimentação, visto que é a fundação para os demais elementos do poço. Usualmente possui diâmetros de 30 ou 36 polegadas.

Fonte: Adaptado de Lake (2007)

Figura 11 - Componentes de um Sistema de Cabeça de Poço Submarina.

1 - AAP  $18 \frac{3}{4}$  pol; 2 - SR  $18 \frac{3}{4} \times 13 \frac{5}{8}$  pol; 3 - SR  $18 \frac{3}{4} \times 9 \frac{5}{8}$  pol; 4 - CVU  $18 \frac{3}{4}$  pol; 5 - Suspensor de Coluna  $18 \frac{3}{4} \times 13 \frac{5}{8}$  pol.



Fonte: O autor

## 2.2 CONJUNTO DE VEDAÇÃO UNIVERSAL (CVU) OU *PACK-OFF*

Considerado um dos componentes mais importantes em um SCPS, possui a função de vedar as colunas de revestimento da cabeça de poço durante a perfuração e produção do poço submarino (BOEHM, 1990). Deve conter a pressão do anular da coluna de revestimento com o alojador de alta pressão, entrando em contato com o petróleo somente quando existir pressão anular existente entre o diâmetro externo do suspensor de revestimento e diâmetro interno do alojador de alta pressão.

Sua montagem requer testes de pressão para confirmação de que podem suportar altas pressões e altas temperaturas (BAI e BAI, 2019). O projeto de tais componentes segue especificações de normas internacionais como API SPEC 6A (API, 2010), API SPEC 17D (API, 2021), API 17TR8 (API, 2022) e ISO 10423 (ISO, 2022). Este equipamento também é chamado de *annular pack-off* (API 6A) e por alguns autores e fabricantes de *packoff*.

O CVU possui alguns requisitos como: fornecer uma vedação metálica sem nenhum elemento elastomérico; possuir mais de um ponto de vedação; sofrer deformação plástica para preencher marcas nas superfícies vedantes; travar no SR; evitar o movimento ascendente devido à pressão no anular; ser compatível com condições de operação adversas (SINGEETHAM, 1991).

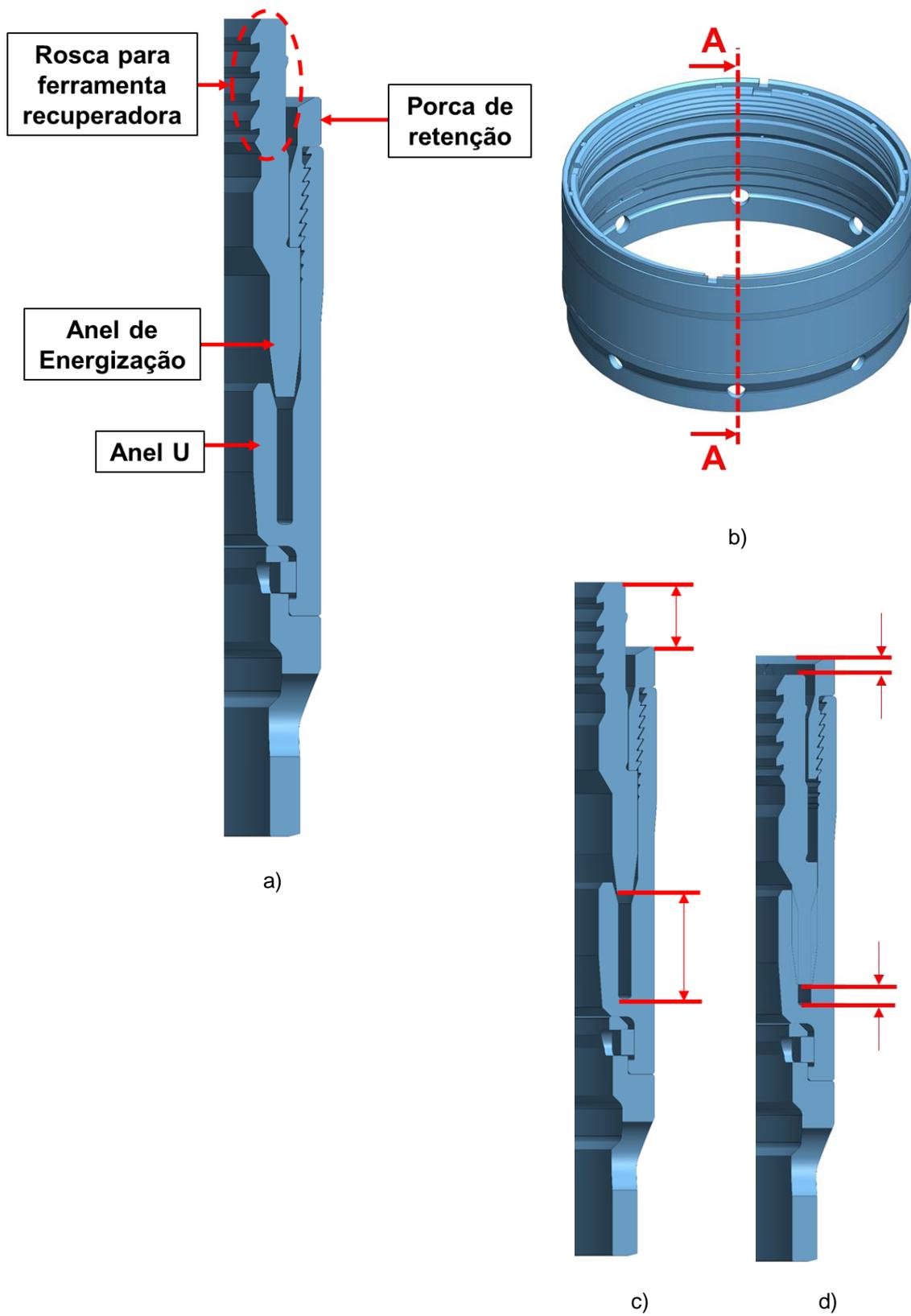
A vedação metálica neste componente é ajustada através do peso (anteriormente o ajuste era realizado meio de torque). Durante sua instalação, é travado no SR afim de mantê-lo fixo em seu local. Caso a produção do poço seja iniciada, pode ser travado no AAP para que não haja um deslocamento ascendente do SR devido à expansão térmica do revestimento do poço (LAKE, 2007).

No interior do AAP existem 3 posições onde os Conjuntos de Vedação Universal podem ser instalados e posteriormente energizados. A alocação dos CVUs em alguma dessas posições dependerá dos equipamentos que serão instalados e das características do poço onde a cabeça de poço será fixada. Por exemplo, a Figura 10(a) apresenta uma configuração com 2 CVUs instalados na 2ª e 3ª posição, enquanto na Figura 10(b) são mostrados 3 CVUs instalados nas 3 posições possíveis do AAP. A Figura 11 (componente 1) apresenta as posições em que um CVU pode ser instalado.

A vedação que um CVU realiza em um SCPS é resultado da vedação metálica gerada por meio da deformação plástica em um de seus componentes. Esta deformação é fruto das geometrias e dos diferentes materiais que o compõem. Entende-se por energização essa deformação plástica, ocasionada por aplicação de força axial ou torque. Neste contexto, o termo energia refere-se a força mecânica que gerou a vedação deste componente.

A força axial mencionada é resultante da pressão de trabalho na qual o componente é testado, sendo geralmente de 15.000 PSI para o sistema 18<sup>3/4</sup> de diâmetro. Esta magnitude de pressão exerce uma força no SR fazendo com que haja um movimento descendente (BOEHM, 1990). A força por pressão ocasiona a energização em ambas as direções, onde a pressão descendente expande a vedação radialmente enquanto a força ascendente move a vedação para cima (SINGEETHAM, 1991). A Figura 12 apresenta uma vista do corte transversal de um CVU sem ser energizado e após sua energização.

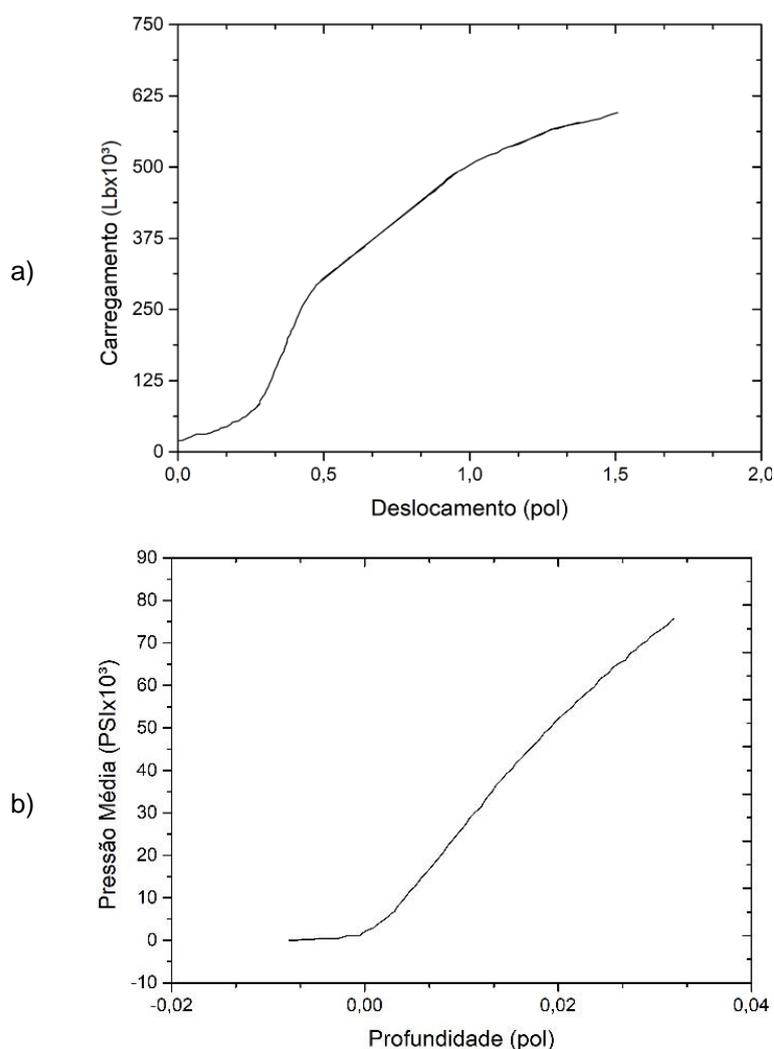
Figura 12 - CVU: a) nomenclatura de componentes, b) vista isométrica, c) não energizado, d) energizado



Fonte: O autor

Nota-se que ocorre um deslocamento descendente do anel de energização em direção ao anel U. Esse movimento ocasiona a deformação plástica do anel U, o que resulta em travamento do CVU na região de *wickers* do AAP e SR. As cargas envolvidas para a energização de um CVU, bem como o deslocamento do anel de energização em relação ao anel U foram mostrados por Boehm (1989), a Figura 13 (a), apresenta o diagrama de tais valores. A pressão média (em PSI) em toda a região dos *wickers*, para o modelo testado de CVU, e a profundidade de penetração dos *wickers* são apresentadas no diagrama da Figura 13 (b).

Figura 13 - Diagramas de energização: a) Carregamento X Deslocamento do anel de energização, b) Pressão média X Profundidade de penetração



Fonte: Adaptado de BOEHM (1989)

Nota-se que para o CVU testado a pressão média em toda a área de vedação dos *wickers* é aproximadamente 70.000 psi.

Singeetham (1991) estabeleceu que este equipamento deve possuir três superfícies esféricas de vedação interna e duas superfícies esféricas de vedação externa. Deve também ser energizado com menos de 15000 libras de peso, possuir um dispositivo opcional de travamento, ser recuperado (removido) com uma força de tração inferior a 50000 libras e ser resistente o bastante para suportar as condições adversas dos poços.

Em meados da década de 1960, a fabricante *Vetco Gray* apresentou um CVU com vedação metal-metal, o qual ficou conhecido como "*Gray Seal*", sendo um marco na indústria petrolífera. Após esse fato, a vedação metálica neste equipamento tem sido utilizada com frequência na extração de petróleo. No Brasil, equipamentos com vedação metal-metal começaram a ser utilizados em meados da década de 1980 (GARCIA, 1997), sendo utilizados até os dias atuais.

### **2.2.1 Vedação Metálica Tipo *Wicker***

Imperfeições superficiais podem agir como canais de vazamento quando duas superfícies estão em contato. Diferentemente da vedação por elementos elastoméricos, metais não preenchem facilmente tais defeitos das superfícies em contato e necessitam de grandes cargas para ocupar esses pequenos canais (BLIZZARD, 1989).

A maioria das vedações metálicas em componentes submarinos de petróleo é do tipo estática. Esta forma de vedação, após sua montagem, é fixa, não havendo movimento entre suas partes, sendo mais utilizada em conexões roscadas, agindo como uma junta de vedação (BLIZZARD, 1989). Flitney (2014) estabelece que tanto para vedações elastoméricas quanto metálicas é necessária alguma deformação do elemento vedante contra a superfície oposta para que haja a vedação. Se faz necessária também uma superfície com bom acabamento superficial para funcionar de forma eficaz.

Conforme FU e CHANG<sup>5</sup> (2011 apud Xiao *et al.*, 2015), para que exista a vedação metálica entre superfícies é necessário que algumas condições sejam obtidas: (1) deve existir uma diferença de dureza entre os materiais; (2) entre as duas superfícies de contato deve haver uma faixa de vedação por pressão contínua; (3) o

---

<sup>5</sup> FU, P.; CHANG, D.G. **Handbook of Seal Design**, Chemical Industry Press, China.

limite de escoamento do elemento vedante deve ser menor em relação ao elemento que será vedado; (4) a pressão de contato deve possuir um valor mínimo para garantir a vedação.

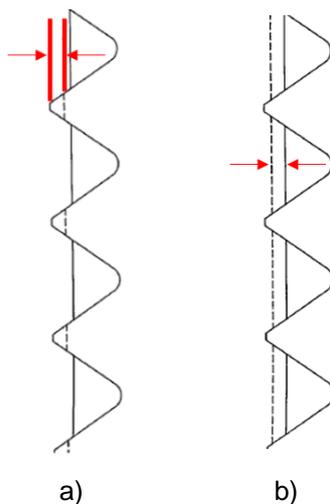
Em SCPS de águas profundas, as temperaturas de operação podem ficar próximas aos 180 °C e pressões em torno de 15.000 PSI. Em vista disso, tais equipamentos necessitam de vedações metálicas que possam operar em uma faixa de temperatura de -4 °C a +120 °C e garantir uma vedação confiável (DANNER, 1990). A ativação/energização de um CVU em um SCPS para altas temperaturas e pressões ocorre por meio do encaixe forçado do corpo de acionamento (anel de energização) em direção ao corpo de vedação (anel U), conforme Figura 12 (c) e (d), resultando em uma deformação plástica no anel U.

Conforme Cai (2010), a energização do CVU ocorre após seu assentamento no SR e no AAP. A deformação plástica causada no anel U faz com que a superfície externa do CVU se ajuste as regiões onde estão localizados os *wickers* do SR e AAP. A pressão de ensaio para testes de vedações de vasos de pressão deve ser de 1,2 a 1,4 vezes a pressão necessária para a energização, e o limite de escoamento dos materiais deve ser diferente.

Danner (1990) define que *wickers* são perfis triangulares paralelos formados por ranhuras em V adjacentes. Nessas regiões, a combinação da elasticidade das paredes do AAP e do SR, juntamente com a plasticidade do CVU, ocasionam uma vedação pré-carregada radialmente. Essa vedação é capaz de suportar até duas vezes a pressão de trabalho (15000 PSI). A deformação causada por estes perfis paralelos triangulares é apresentada na Figura 14, tanto nos *wickers* quanto no elemento mais dúctil (vedante). As distâncias representadas pelas setas vermelhas na Figura 14, são aproximadamente 0,15 polegadas nos *wickers* e 0,25 polegadas no elemento vedante CVU.

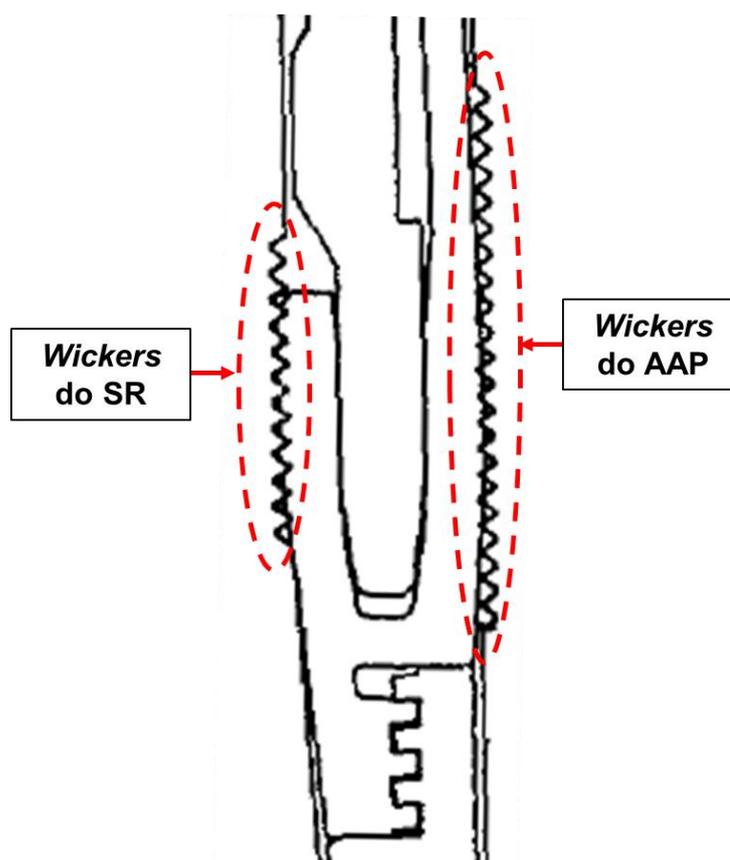
A quantidade de *wickers* presente em componentes de um SPCS varia de acordo com cada fabricante. Danner (1990) estabelece que o comprimento de uma polegada na região de *wickers* oferece 8 cristas destes perfis para que ocorra a vedação. Alguns fabricantes adotam a presença de 22 a 26 *wickers* na região aonde será instalado o CVU, tendo um maior número de *wickers* no AAP. A Figura 15, apresenta uma ampliação da região de *wickers* do SR e do AAP de um SCPS.

Figura 14 - Deformações causadas em: a) *wickers* e b) CVU



Fonte: Adaptado de BOEHM (1990)

Figura 15 - Ampliação da região de *wickers* do APP e SR

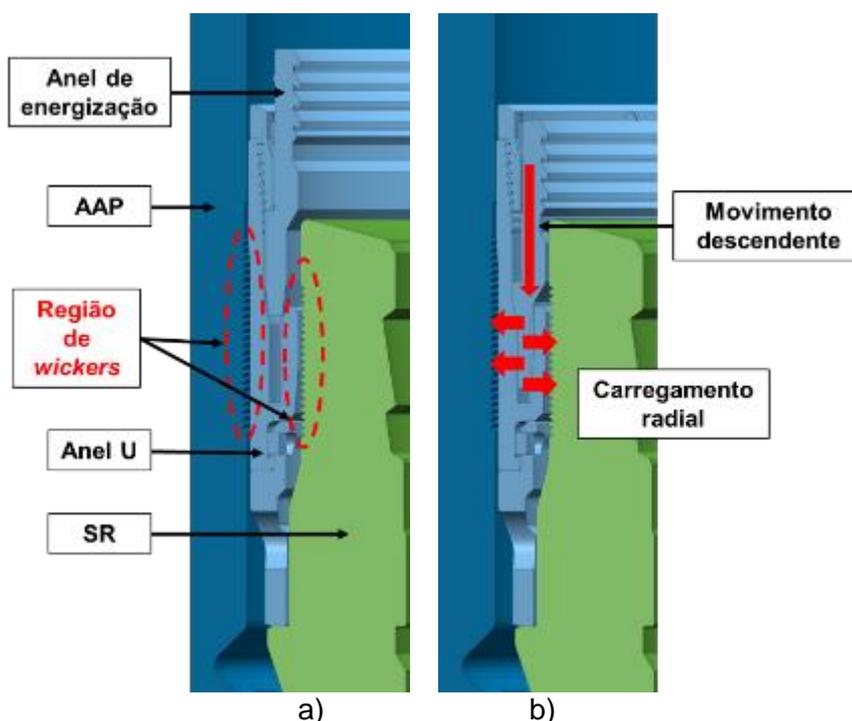


Fonte: Adaptado de DANNER (1990)

Percebe-se que o conjunto mostrado na Figura 15 possui 22 perfis triangulares (*wickers*) na região de vedação do AAP e 12 perfis na região de vedação do SR. Neste trabalho foram executados ensaios com Corpos de Provas (CPs) contendo dois e

quatro *wickers*, com geometria semelhante às encontradas em equipamentos utilizados pela Petrobrás, com o intuito de avaliar a influência de um canal de vedação (CP com 2 *wickers*) e de três canais de vedação (CP com 4 *wickers*), na estanqueidade das amostras. A Figura 16 apresenta uma vista em corte dos componentes de um SPCS.

Figura 16 - Vista em corte de um SPCS: a) indicação dos componentes, b) representação dos carregamentos



Onde: CVU = anel U + anel de energização

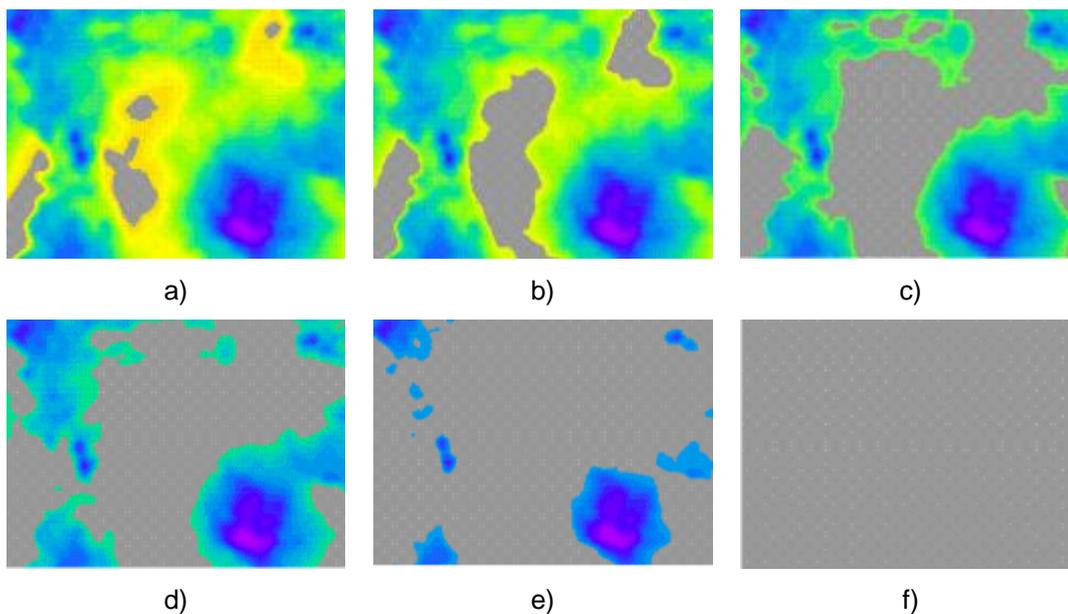
Fonte: O autor

O movimento vertical descendente, ocasionado pela pressão axial, resulta em um carregamento radial causado pela deformação plástica ocorrida no anel U do CVU, conforme Figura 16(b). No Brasil, equipamentos com vedações energizadas por pressão foram introduzidos em 1994, com CVUs de vedação metálica recuperáveis em apenas uma manobra através da ferramenta de recuperação. Os AAPs destes sistemas poderiam suportar as pressões de 15.000 PSI sem perder as capacidades mecânicas de alojamento (GARCIA, 1997).

Popov (2010) descreve que um elemento de vedação tem objetivo de minimizar ou prevenir a transferência de massa unidirecional de um ponto para outro. Na maioria das vezes, o seu funcionamento está embasado na força de compressão aplicada

entre as superfícies. O carregamento axial pode ser resultado da aplicação de pressão em um dos elementos, tornando-a uma pressão de contato que resulta na vedação. A Figura 17 apresenta uma sequência de imagens mostrando que o aumento da compressão resulta na diminuição dos vazamentos, chegando a uma condição sem vazamentos para líquidos e gases (Figura 17 (f)).

Figura 17 - Vedação de uma superfície em função da força de compressão



Onde: As regiões de vazamento, representadas pelas formas coloridas da imagem, são inexistentes em (f), quando atingiu-se a força compressiva necessária para formar uma área de contato capaz de impedir a passagem de qualquer fluido, seja líquido ou gasoso.

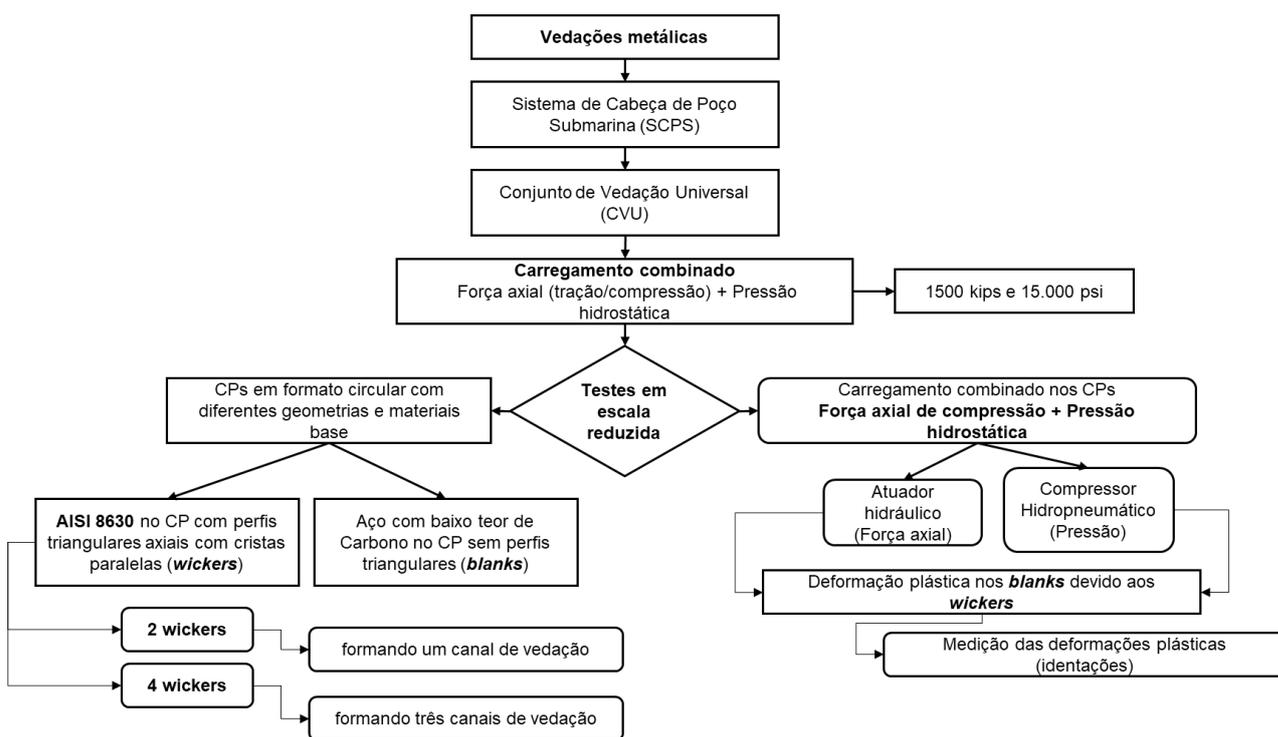
Fonte: Popov (2010)

O contato entre duas superfícies, quando comprimidas juntas, ocorre apenas em alguns pontos, e não na totalidade da área. Tal fato se dá devido as imperfeições superficiais existentes (PERSSON, 2007). O aumento da rugosidade nominal acarreta em uma diminuição da área de contato e aumento da pressão de contato nos pontos mais elevados (“picos”).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 18 apresenta o fluxograma deste trabalho, com os tópicos como carregamento combinado (pressão hidrostática e força axial) e comportamento de vedações metálicas.

Figura 18 - Fluxograma da metodologia



Fonte: O autor

#### 3.1 MATERIAIS

Os corpos de prova utilizados foram confeccionados com materiais e durezas distintas. A utilização de CPs com diferença de dureza se pela necessidade de ocorrer deformações plásticas no elemento com menor dureza (corpo de prova vedante). Estas deformações são as responsáveis por garantir a estanqueidade nos elementos testados. Os CPs denominados *blanks* (confeccionados em aço com baixo teor de carbono) com durezas de 125 a 130 *Hardness Brinell* (HB), similar ao aço AISI 1018 (BOEHM, 1990). Já os CPs que possuem as cristas paralelas, denominados *wickers*, apresentam durezas da ordem de 230 HB (confeccionados em aço AISI 8630). Ambas

configurações dos CP's foram obtidas por meio de aços laminados e posteriormente usinados em tornos CNC's.

A escolha desses aços justifica-se pelo fato de que componentes de SCPS (mais especificamente AAPs) e de ANMs verticais são constituídos de aços de baixa liga, mais especificamente AISI 8630, por possuírem menores custos de aquisição, maior facilidade de soldagem, podendo ter limitações de aplicação em ambientes corrosivos (BAI e BAI, 2019; RONG e ZHU, 2021). Ambos aços são classificados como hipoeutetóides, ou seja, possuem em peso teores de carbono (C) menores que 0,77% sendo os mais produzidos e consumidos nas aplicações de engenharia (KWIETNIEWSKI *et al.*, 2014). Os ensaios em escala reduzida foram realizados nas dependências do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) pertencente a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Como pode ser visto na Tabela 4, para obtenção dos resultados, foram utilizados um total de 48 CPs (entre *blanks* e *wickers*).

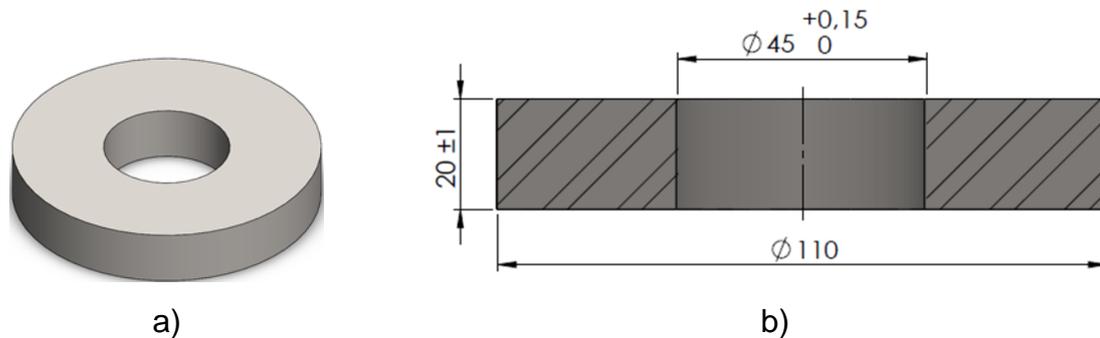
Tabela 4 - Quantidade de CPs utilizada

Corpos de Prova	Quantidade utilizada
2 <i>wickers</i>	14
4 <i>wickers</i>	10
<i>Blanks</i>	24

A diferença na quantidade de CPs do tipo *wickers* deve-se ao fato da existência de uma versão preliminar deste ensaio, onde a força axial foi exercida por meio de um sistema porca/parafuso, ambos M42. Esta força é responsável pela deformação plástica encontrada nos *blanks*. Contudo, a metodologia com parafuso resultou em uma força axial de compressão insuficiente para compensar a pressão aplicada. O conceito de tal metodologia é apresentado no APÊNDICE A, nesta versão preliminar foram utilizados 4 CPs contendo 2 *wickers*.

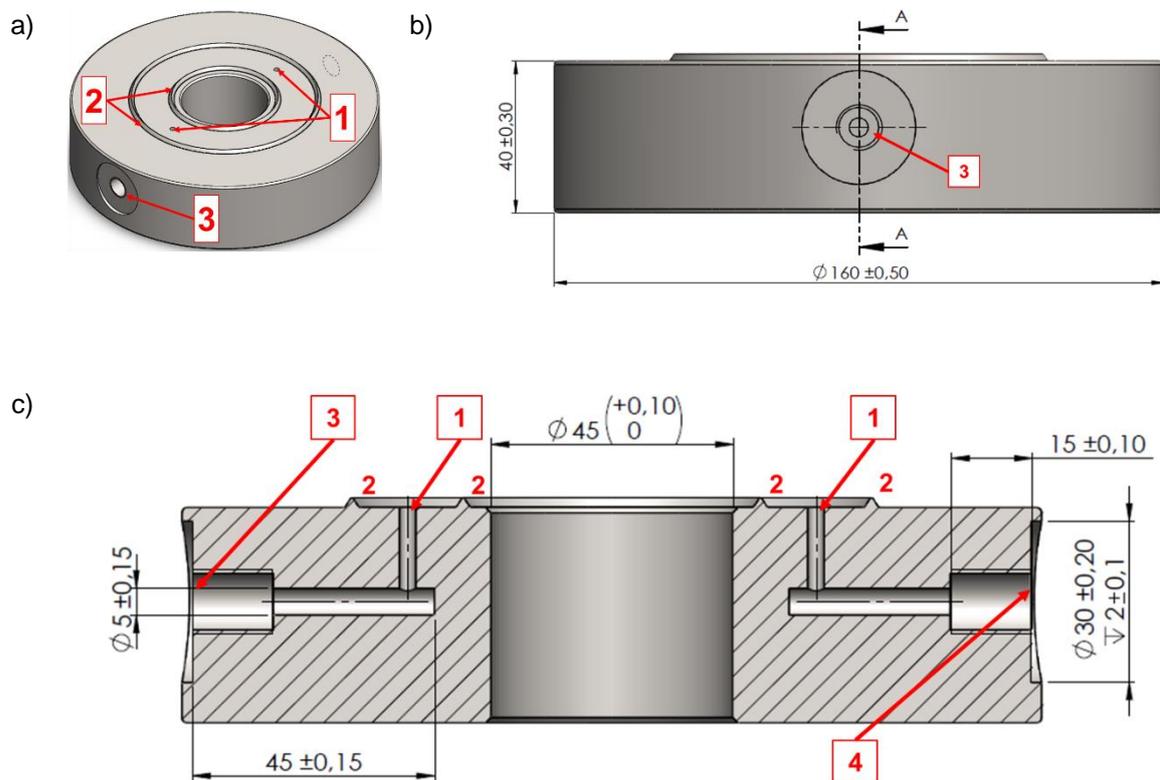
As principais dimensões dos CPS *blanks* e *wickers* (com 2 e 4 perfis triangulares paralelos) são apresentadas nas Figuras 19, 20 e 21.

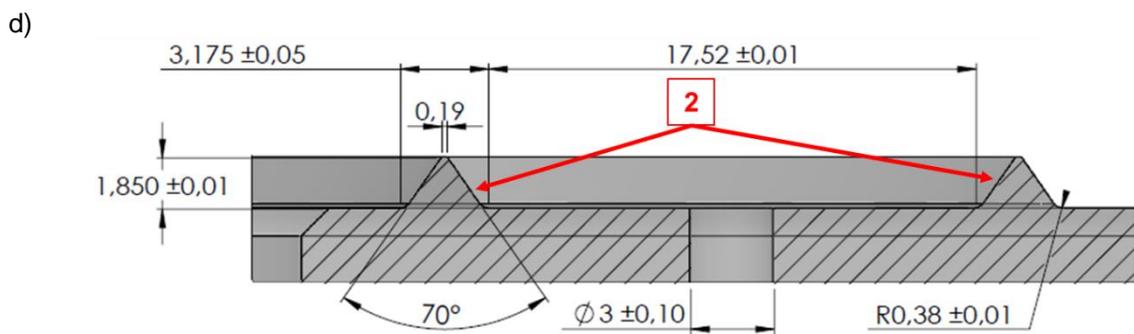
Figura 19 - Principais dimensões dos Blanks: a) vista isométrica, b) vista em corte. Dimensões em mm.



Fonte: O autor

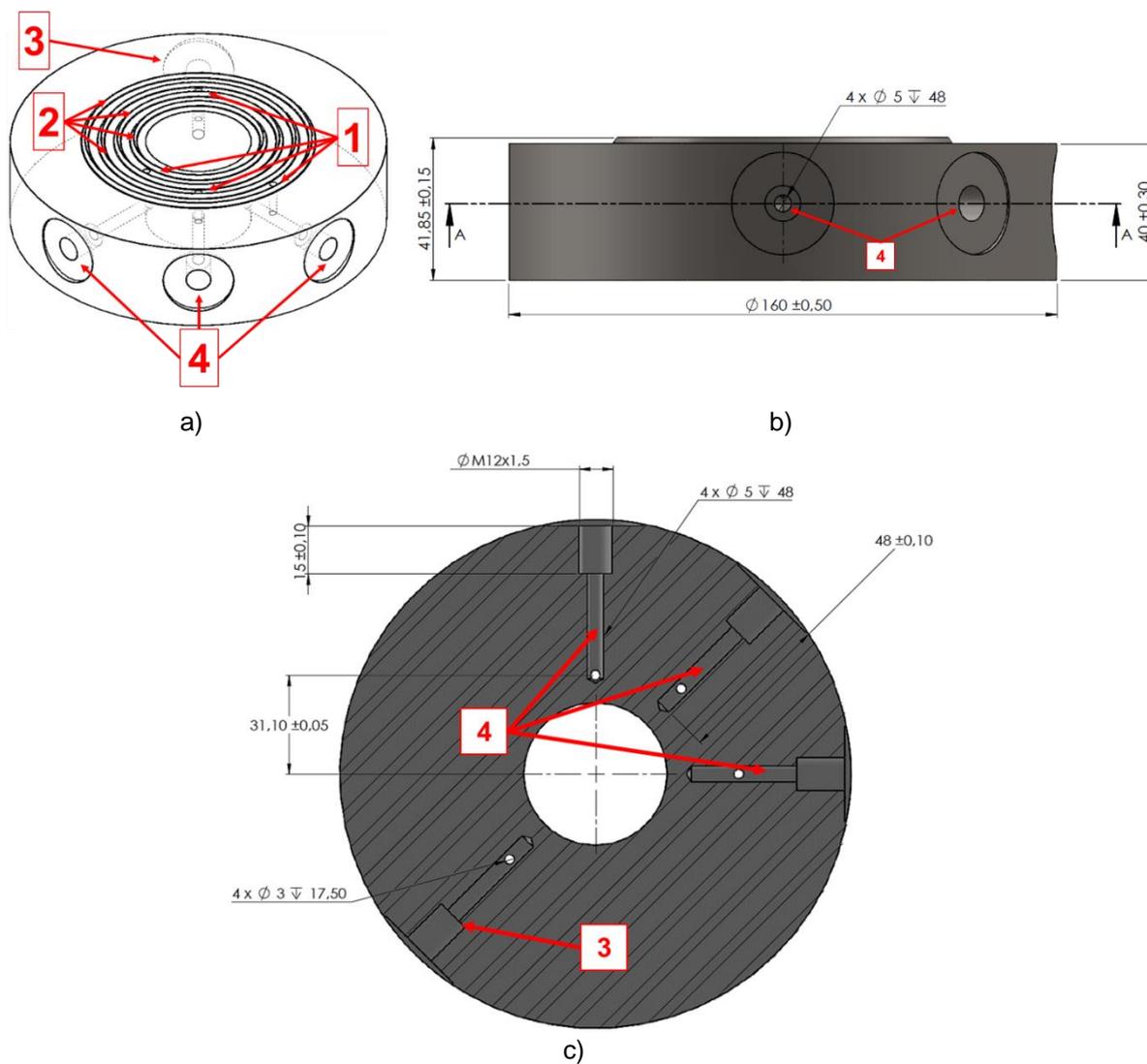
Figura 20 - Principais dimensões do CP 2 wickers: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista em corte (seção A-A), d) detalhe perfis triangulares paralelos. 1- Orifícios para passagem de pressão; 2- Perfis triangulares paralelos (wickers); 3- Orifício para entrada de pressão; 4- Orifício para conexão de célula de pressão. Dimensões em mm.

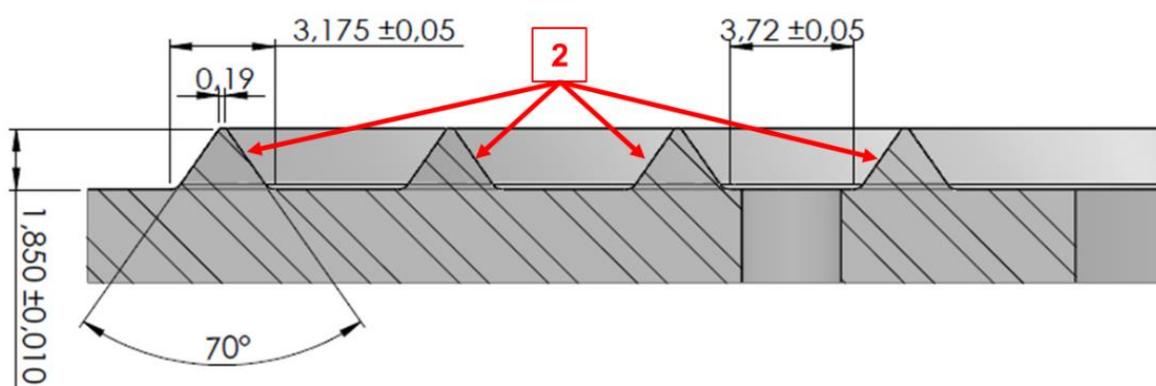




Fonte: O autor

Figura 21 - Principais dimensões do CP 4 wickers: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista em corte (seção A-A), d) detalhe perfis triangulares paralelo. 1- Orifícios para passagem de pressão; 2- Perfis triangulares paralelos (*wickers*); 3- Orifício para entrada de pressão; 4- Orifício para conexão de célula de pressão. Dimensões em mm.



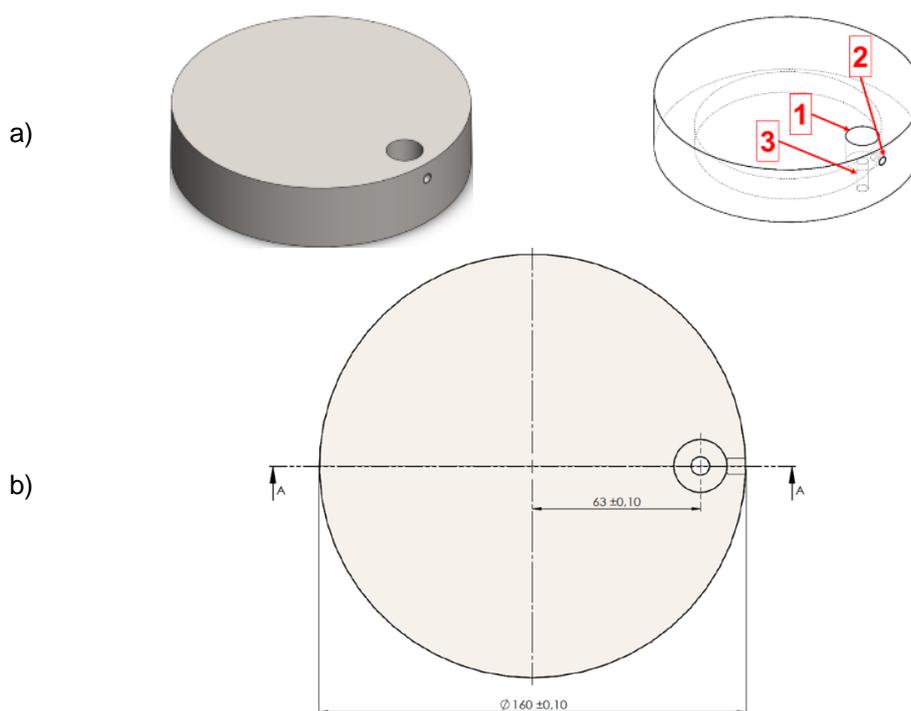


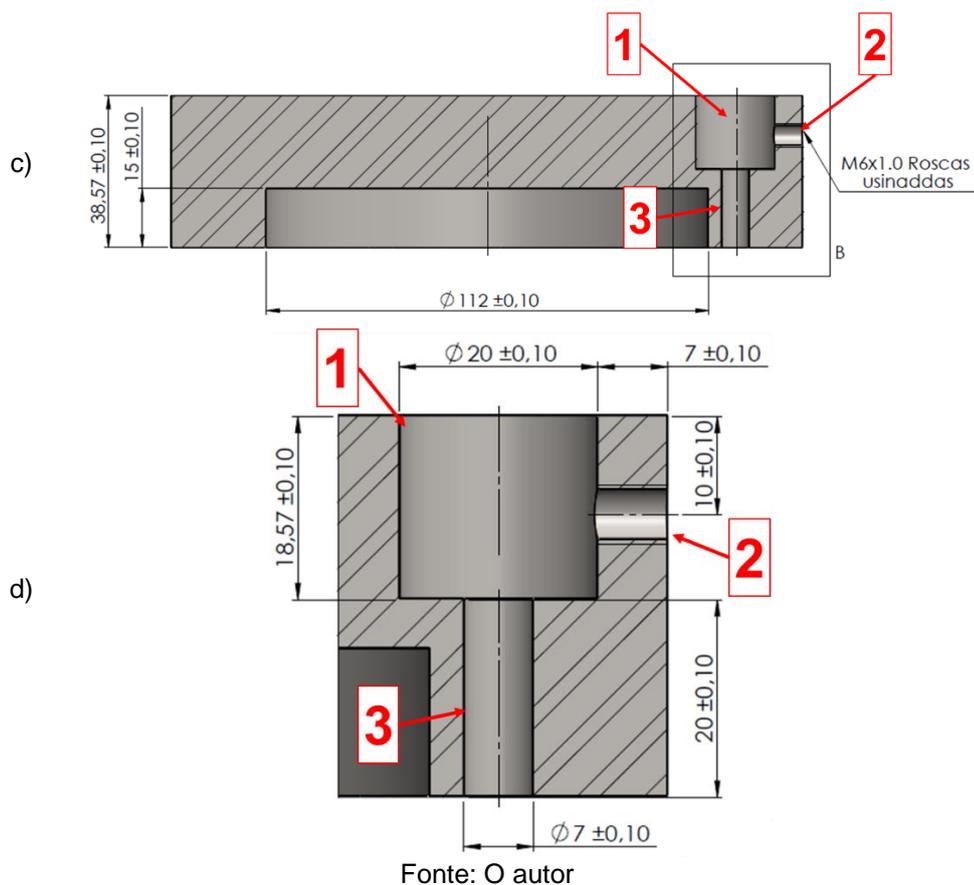
d)

Fonte: O autor

Para a realização dos ensaios em escala reduzida, foi projetado e desenvolvido um componente denominado “luva”. Este componente fornece ao atuador hidráulico uma face plana para a aplicação do carregamento axial, permitindo que ocorra nos *blanks* uma deformação plástica uniforme. As dimensões deste componente estão apresentadas na Figura 22, o qual contou também com um sensor de deslocamento (*Linear Variable Differential Transformer* - LVDT).

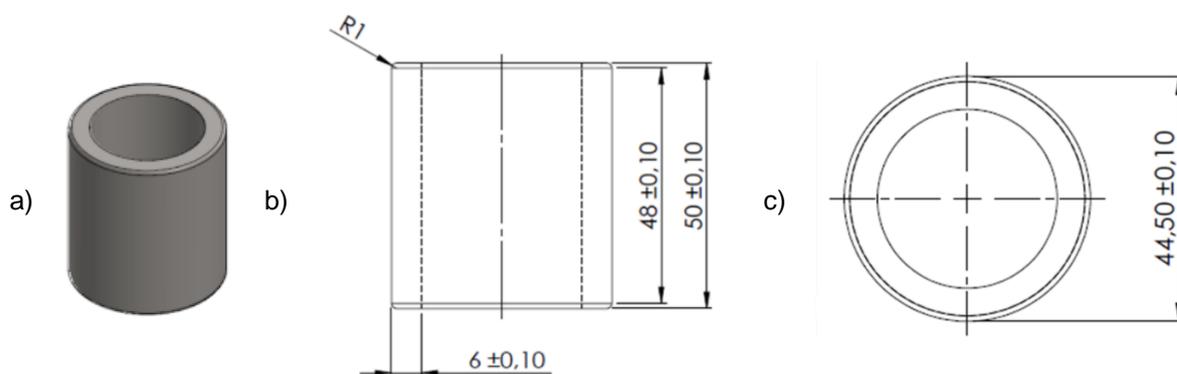
Figura 22 - Dimensões do componente “luva”: a) vista isométrica, b) vista superior, c) vista em corte (seção A-A), d) detalhe da furação para fixação do sensor LVDT. 1- Orifício para encaixe do sensor LVDT; 2- Furo roscado para fixação do sensor LVDT; 3- Orifício para encaixe da haste do sensor. Dimensões em mm.





A Figura 23 apresenta as dimensões do dispositivo centralizador, utilizado para garantir alinhamento entre os componentes *blank* e *wickers*, possibilitando que as marcações, resultantes da deformação plástica, fossem concêntricas.

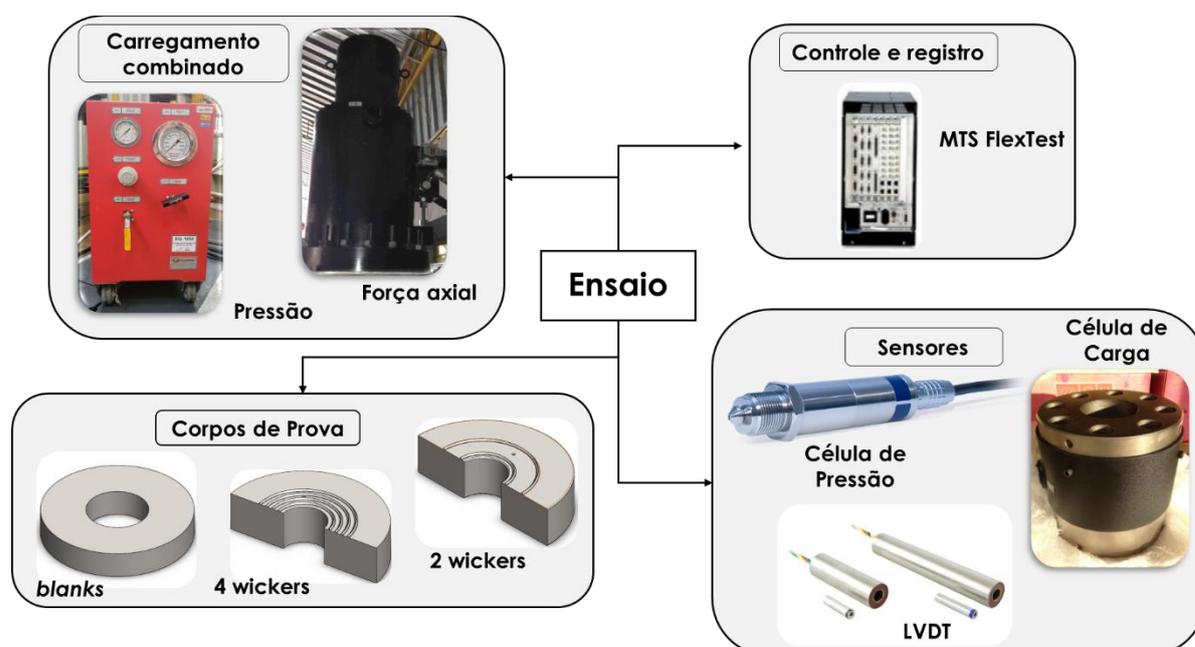
Figura 23 - Dimensões do centralizador: a) vista isométrica, b) vista frontal, c) vista superior. Dimensões em mm.



### 3.2 MÉTODOS

O carregamento combinado ocorre quando um corpo é submetido, simultaneamente, a dois tipos de carregamentos distintos. Esse tipo de esforço ocorre nos CVUs, os quais são submetidos a aplicação de força e pressão quando estão em operação. Estes componentes são homologados conforme a Norma API SPEC 6A (API, 2010), a qual define requisitos mínimos de aceitação. A Norma, no entanto, não exige que tais equipamentos sejam testados com aplicação de pressão e força simultaneamente. Uma visão geral do conceito dos experimentos práticos é apresentada na Figura 24.

Figura 24 - Visão geral dos ensaios em escala reduzida



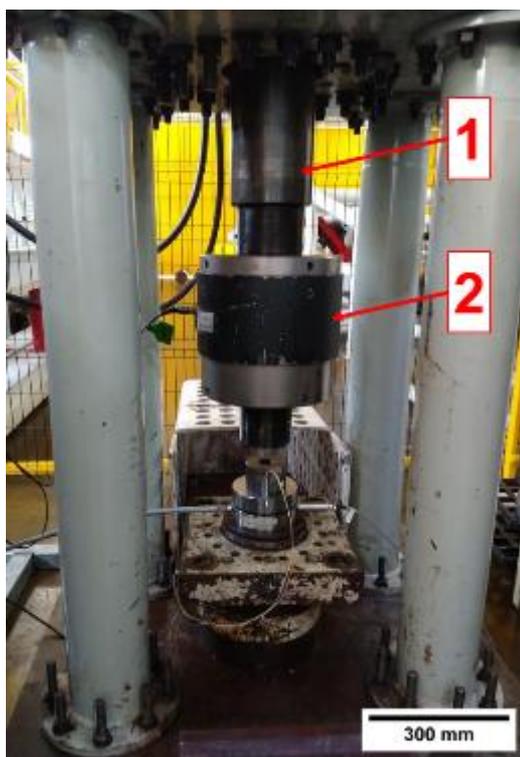
Fonte: O autor

#### 3.2.1 Teste Mecânico com Carga Combinada

A Figura 25 apresenta a bancada de ensaios onde tais foram realizados. Essa bancada encontra-se equipada com atuador hidráulico, sensor de deslocamento (acoplado ao atuador) e célula de carga. O atuador hidráulico utilizado foi da fabricante *Hidrausul* e possui a capacidade de 3000 kN de carga estática. Os valores do carregamento axial (de compressão) foram aquisitados por meio de célula de carga

(transdutor de força) com capacidade de 3.000 kN, modelo CCI-300.000, fabricante *Kratos Equipamentos*.

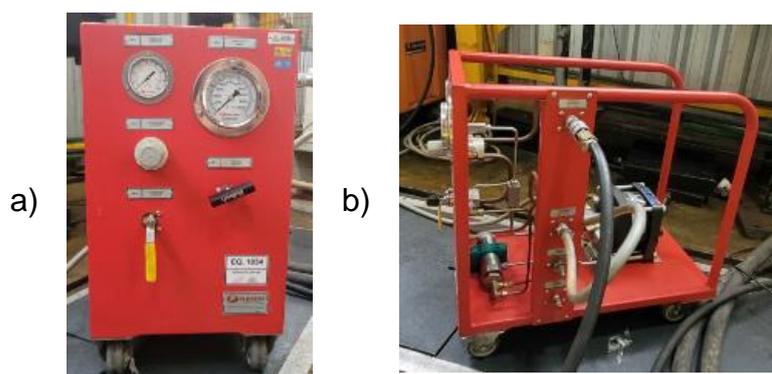
Figura 25 - Bancada de ensaios em trilhos ferroviários. 1- haste do atuador hidráulico; 2- célula de carga com capacidade de medição de 3000 KN.



Fonte: O autor

A aplicação de pressão foi realizada por meio de compressor hidropneumático com capacidade de até 20.000 PSI (1379 Bar), modelo ASF-150 da fabricante Flutrol, o qual é apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Compressor hidropneumático: a) Vista Frontal, b) Vista lateral

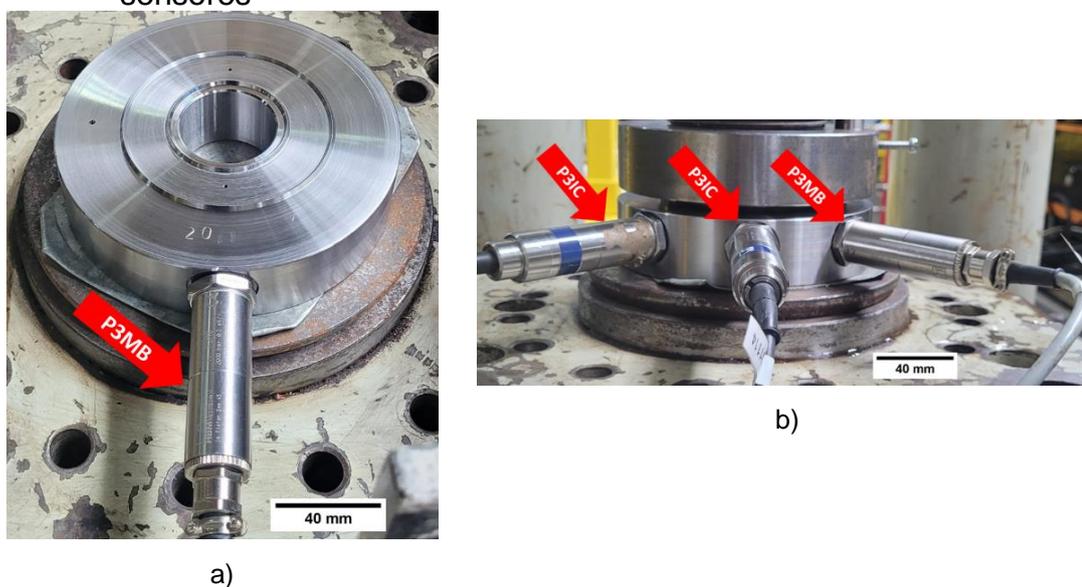


Fonte: O autor

### 3.2.2 Medições da Pressão Hidrostática

Para a aquisição dos valores da pressão hidrostática, foram conectadas células de pressão (transdutores de pressão) nos CPs (*wickers*), através de conexões roscadas. Os orifícios onde foram instaladas são aqueles apresentados nas Figuras 20 e 21, indicados pelo número 4 nas imagens. Estes sensores, da fabricante HBM, modelos P3IC e P3MB, possuem pressão nominal de 29.000 PSI (2000 Bar) e classe de exatidão de 0,2. As formas de instalação dos sensores nos CPs são expostas na Figura 27.

Figura 27 - Células de pressão instaladas: a) CP (2 *wickers*), b) CP (4 *wickers*) com 3 sensores



Fonte: O autor

Nos CPs de 4 *wickers*, cada um desses transdutores de pressão realizou a leitura de um canal de vedação. A Tabela 5 apresenta as nomenclaturas, modelos e qual canal de vedação tais sensores estavam conectados.

Tabela 5 - Células de Pressão CPs de 4 *wickers*

Nomenclatura	Modelo	Canal de Vedação
Eq 1113	P3IC	Canal de vedação 1
Eq 1114	P3IC	Canal de vedação 2
Eq 1115	P3MB	Canal de vedação 3

Onde: Eq = Equipamento

### 3.2.3 Medições de Deslocamento entre os CPs

Os deslocamentos entre os CPs foram obtidos por meio de sensor de deslocamento do tipo LVDT, o qual foi instalado no componente “luva”, conforme Figura 22 (item 1). O LVDT utilizado possui capacidade de medição de até 16,5 mm de deslocamento e sensibilidade de  $0,50 \text{ V/V} \pm 10\%$  em fundo de escala, sendo fabricado por TransTek, modelo 0215-0000.

### 3.2.4 Controle e Registro dos Sinais

O registro dos sinais recebidos dos sensores (deslocamento entre CPs, pressão, carregamento axial, controle de deslocamento do atuador e força aplicada nas amostras) foi realizado por meio de controlador *FlexTest* 100 da fabricante MTS, modelo 494.10, com frequência de registro de 5 Hz.

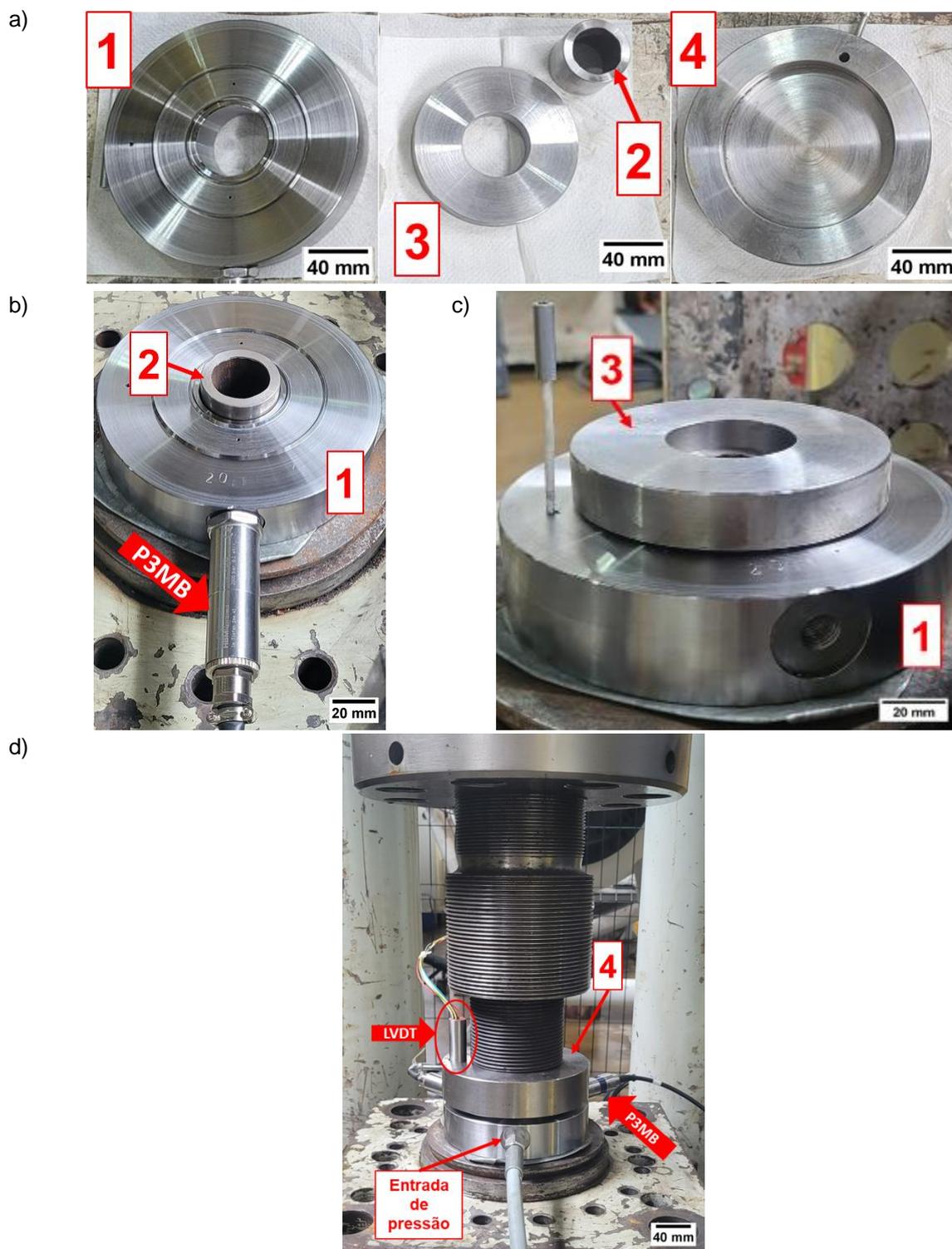
### 3.2.5 Montagem dos CPs para o Ensaio

Com o objetivo de facilitar o entendimento da montagem dos CPs, foi elaborada a Tabela 6. Nela estão apresentadas e descritas as etapas de montagem. A Figura 28 exibe um conjunto de imagens feitas durante o posicionamento dos CPs para realização dos ensaios, exemplificando as etapas da Tabela 6.

Tabela 6- Etapas de montagem dos ensaios

Etapa	Descrição
1 <sup>a</sup>	Limpeza dos corpos de prova, com acetona;
2 <sup>a</sup>	Inserir centralizador no CP <i>Wicker</i> ;
3 <sup>a</sup>	Conectar célula de pressão (P3MB) no CP <i>Wicker</i> ;
4 <sup>a</sup>	Inserir CP <i>Blank</i> acima do CP <i>Wicker</i> ;
5 <sup>a</sup>	Posicionar o componente “Luva” acima do CP <i>Blank</i> ;
6 <sup>a</sup>	Conectar a entrada de pressão no CP <i>Wicker</i> ;
7 <sup>a</sup>	Conectar e fixar sensor LVDT no componente “Luva”.

Figura 28 - Montagem dos testes: a) corpos de prova, b) 1ª pré montagem, c) 2ª pré montagem, d) arranjo do ensaio. 1- CP Wicker, 2- Centralizador, 3- CP Blank, 4- Luva.

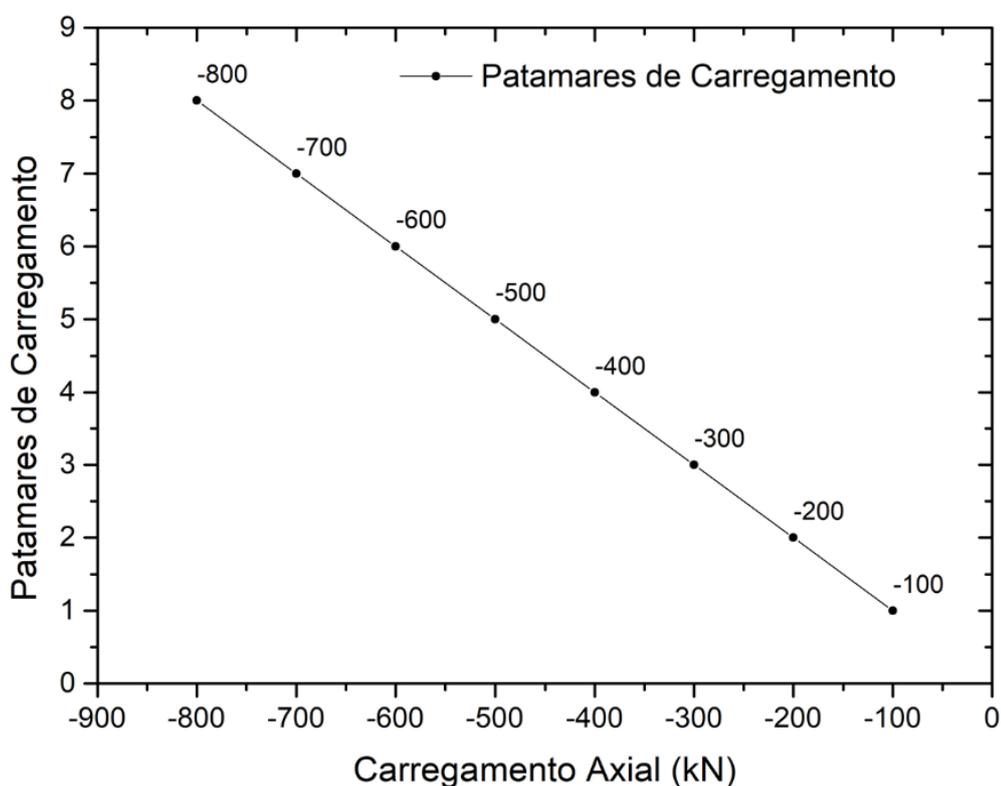


Fonte: O autor

### 3.2.6 Forças e Pressões aplicadas

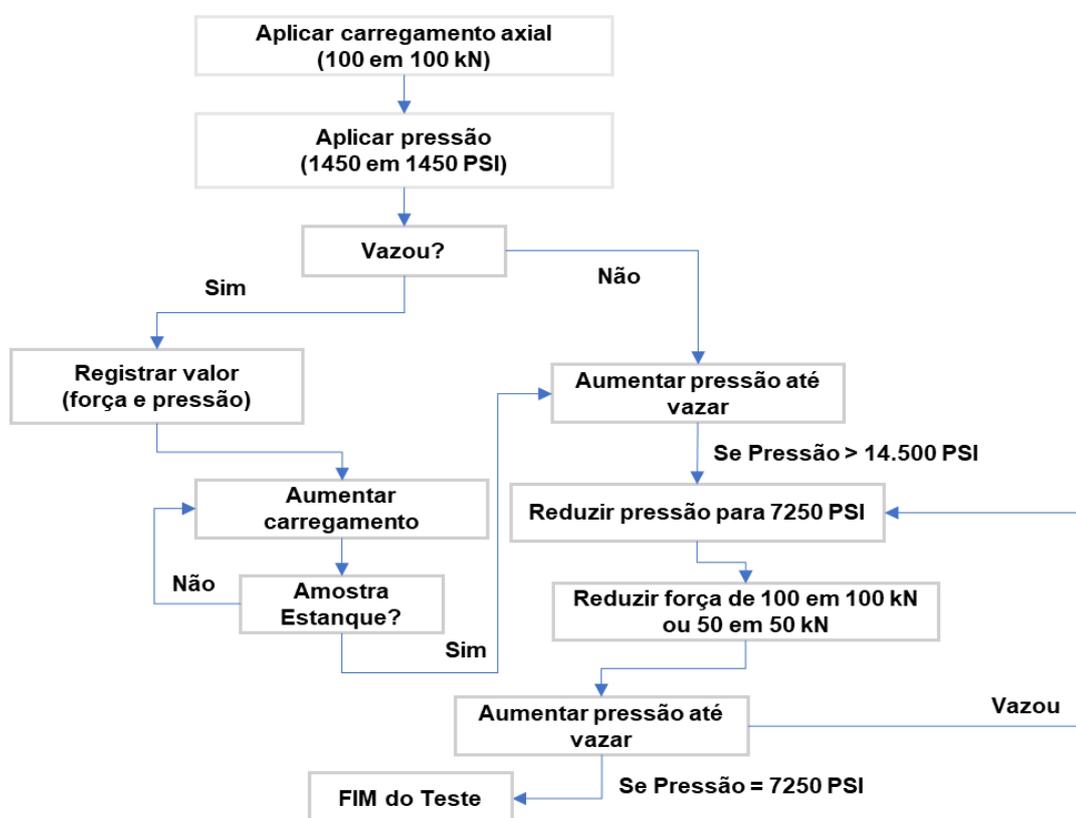
A execução dos experimentos, com carregamento combinado, ocorreu através do aumento gradativo do esforço axial (de compressão) com incrementos de 100 kN a cada patamar (Figura 29), onde as cargas possuem sinais negativos por serem de compressão. A pressão hidrostática, aplicada simultaneamente com o carregamento, também ocorreu com incrementos de 1450 PSI (100 Bar). O objetivo destes acréscimos (de força e pressão) foi de analisar a influência da variação de tais parâmetros na estanqueidade das amostras. A lógica sequencial de execução dos experimentos é apresentada na Figura 30.

Figura 29 - Valores de carregamento axial



Fonte: O autor

Figura 30 - Sequência experimental



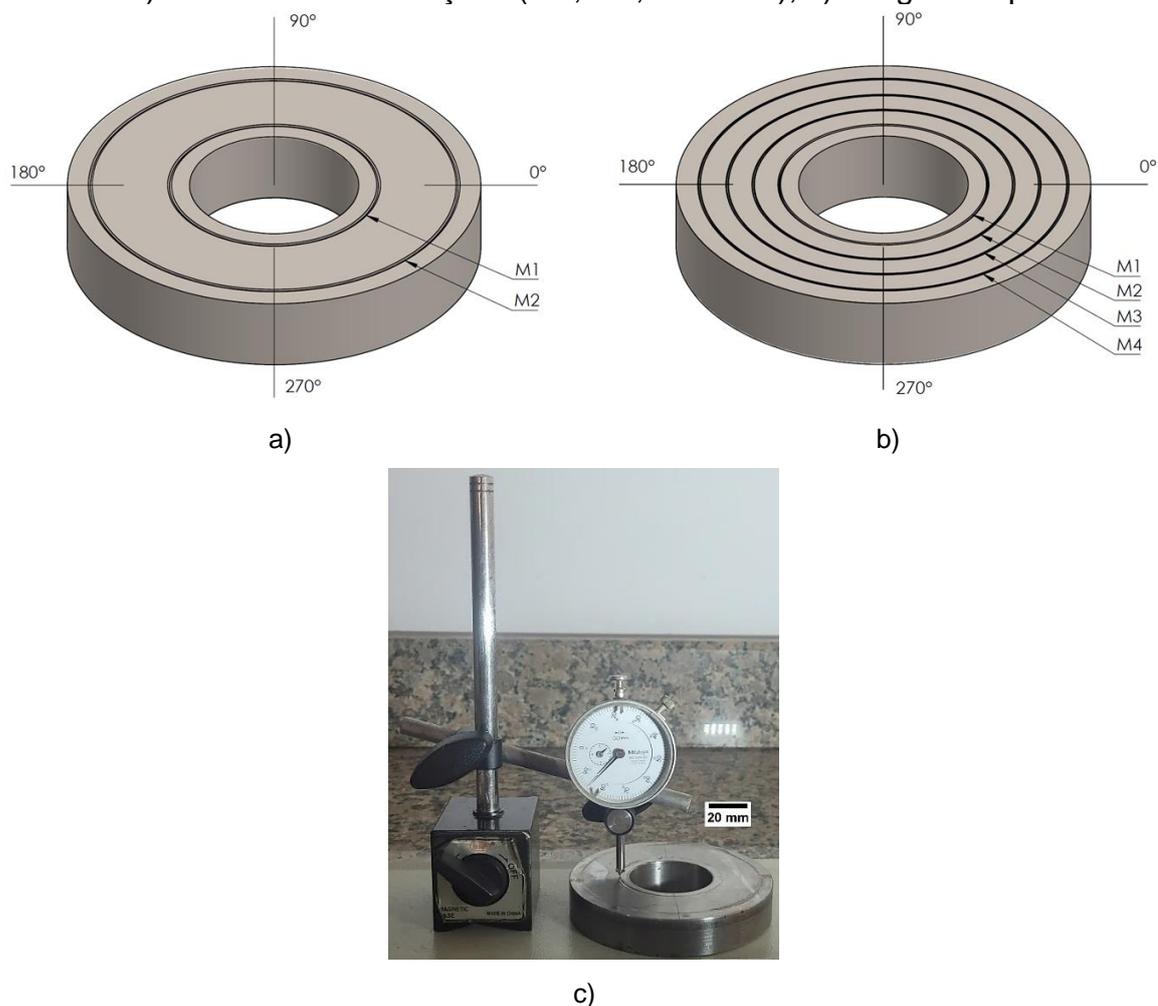
Fonte: O autor

### 3.2.7 Profundidade de deformação plástica e medição de dureza

As profundidades das deformações plásticas presentes nos CPs *Blank* foram aferidas por meio de dois equipamentos. Primeiramente, os CPs foram medidos através de relógio comparador *Mitutoyo* NO. 2050-OB, com resolução de 0,01 mm, fixado em uma superfície metálica por meio de base magnética. Mediram-se as profundidades em cada uma das marcações (defasados em 90°), conforme Figura 31.

As durezas dos CPs foram aferidas com equipamento microdurômetro da fabricante Instron, modelo Tukon 2100B, com resolução de 0,1 mm e faixa de aceitação de 150 a 750 HV (*Vickers*).

Figura 31 - Aferição das deformações plásticas: a) Blank com 2 marcações (M1 e M2), b) Blank com 4 marcações (M1, M2, M3 e M4), c) relógio comparador



Fonte: O autor

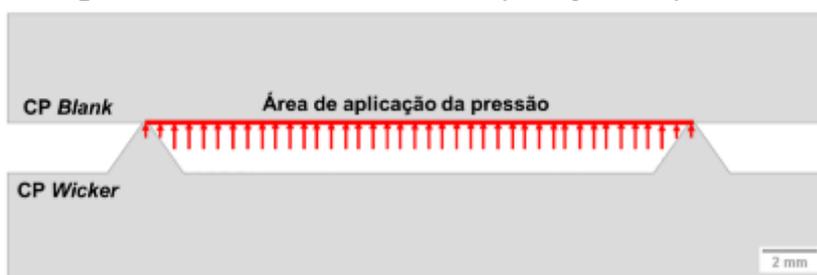
### 3.2.8 Cálculo da Força Efetiva

Define-se Força Efetiva ( $FE$ ) a resultante da subtração da força aplicada mediante atuador hidráulico com a força exercida pela pressão hidrostática aplicada nos CPs, ou seja:

$$\text{Força Efetiva} = \text{Força Atuador} - \text{Força por Pressão} \quad (1)$$

Adotou-se esta abordagem pois a pressão opõe-se ao carregamento (força) exercido pelo atuador hidráulico gerando uma força confinada na área entre dois perfis triangulares paralelos (*wickers*). A Figura 32 apresenta esta região em detalhe.

Figura 32 - Área confinada de aplicação da pressão



Fonte: O autor

Para a determinação da força exercida pela pressão hidrostática, *Força por Pressão (FP)*, foi utilizada a Equação 2, a qual quantifica a pressão exercida em uma determinada superfície de contato.

$$P = \frac{F}{A} \quad (2)$$

onde  $P$  é a pressão,  $F$  a força exercida na superfície e  $A$  área em que a força está sendo aplicada.

Tendo em vista que a pressão era controlada por meio de unidade hidrostática, a força exercida por esta pressão é calculada através da Equação 3.

$$FP = P_{\text{pressão Aplicada}} \cdot A \quad (3)$$

onde a área ( $A$ ) é determinada por meio da Equação 4, definida como a área de duas circunferências concêntricas.

$$A = \pi(R_e - R_i)^2 \quad (4)$$

onde  $R_e$  e  $R_i$  são os raios das circunferências externas e internas, respectivamente,  $\pi$  é o número adimensional definido como a razão do perímetro pelo diâmetro de uma circunferência ( $\pi/\varnothing$ ).

As unidades utilizadas para estas grandezas são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Unidades de P, F e A

Grandeza	Unidade
Pressão [ $P$ ]	PSI
Força [ $F$ ]	kN
Área [ $A$ ]	mm <sup>2</sup>

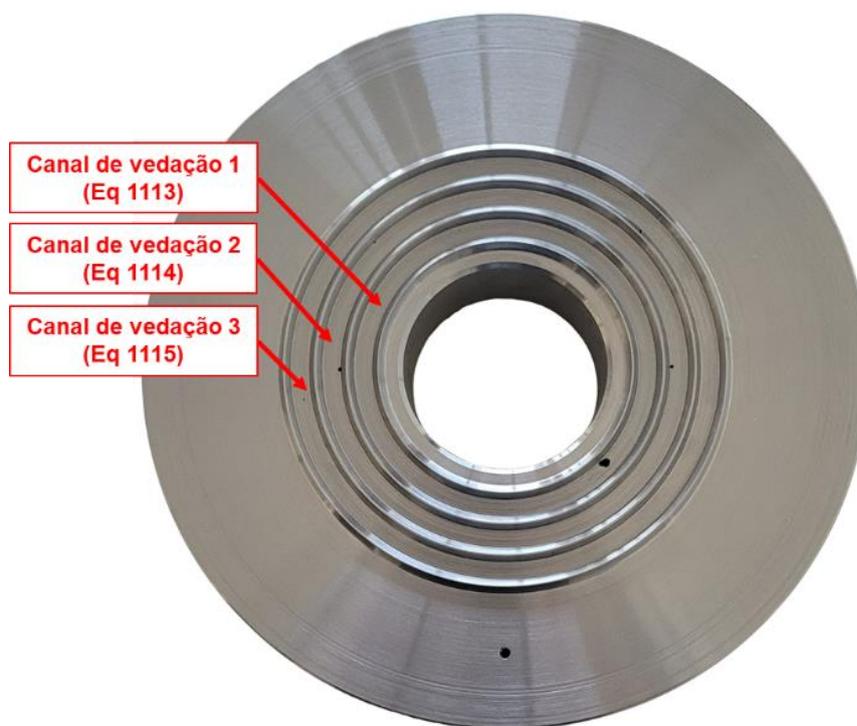
A determinação das forças por pressão foi calculada por meio das equações apresentadas na Tabela 8, para 2 e 4 *wickers*, respectivamente.

Tabela 8 - Equações para cálculo da força de pressão

Número de wickers	Equação
2	$FP = \frac{\text{Pressão Aplicada}}{10.000} \left( \frac{\pi((\phi_A + 3,175)^2 - (\phi_B - 3,175)^2)}{4} \right) \quad (5)$
4	$FP_1 = \frac{\text{Pressão Aplicada}_1}{10.000} \left( \frac{\pi((\phi_C + 3,175)^2 - (\phi_B - 3,175)^2)}{4} \right) \quad (6)$
	$FP_2 = \frac{\text{Pressão Aplicada}_2}{10.000} \left( \frac{\pi((\phi_D + 3,175)^2 - (\phi_E - 3,175)^2)}{4} \right) \quad (7)$
	$FP_3 = \frac{\text{Pressão Aplicada}_3}{10.000} \left( \frac{\pi((\phi_A + 3,175)^2 - (\phi_F - 3,175)^2)}{4} \right) \quad (8)$
Onde:	$\phi_A = 93,52 \text{ mm}; \phi_B = 58,48 \text{ mm}; \phi_C = 65,93 \text{ mm}; \phi_D = 79,72 \text{ mm};$ $\phi_E = 72,28 \text{ mm}; \phi_F = 86,07 \text{ mm}; 10.000$ - Fator de conversão de unidades.

As pressões para 4 *wickers*, apresentadas na Tabela 8, denominadas *Pressão Aplicada*<sub>1</sub>, *Pressão Aplicada*<sub>2</sub> e *Pressão Aplicada*<sub>3</sub> correspondem, respectivamente, a pressão dos canais de vedação 1, 2 e 3, indicados na Figura 33.

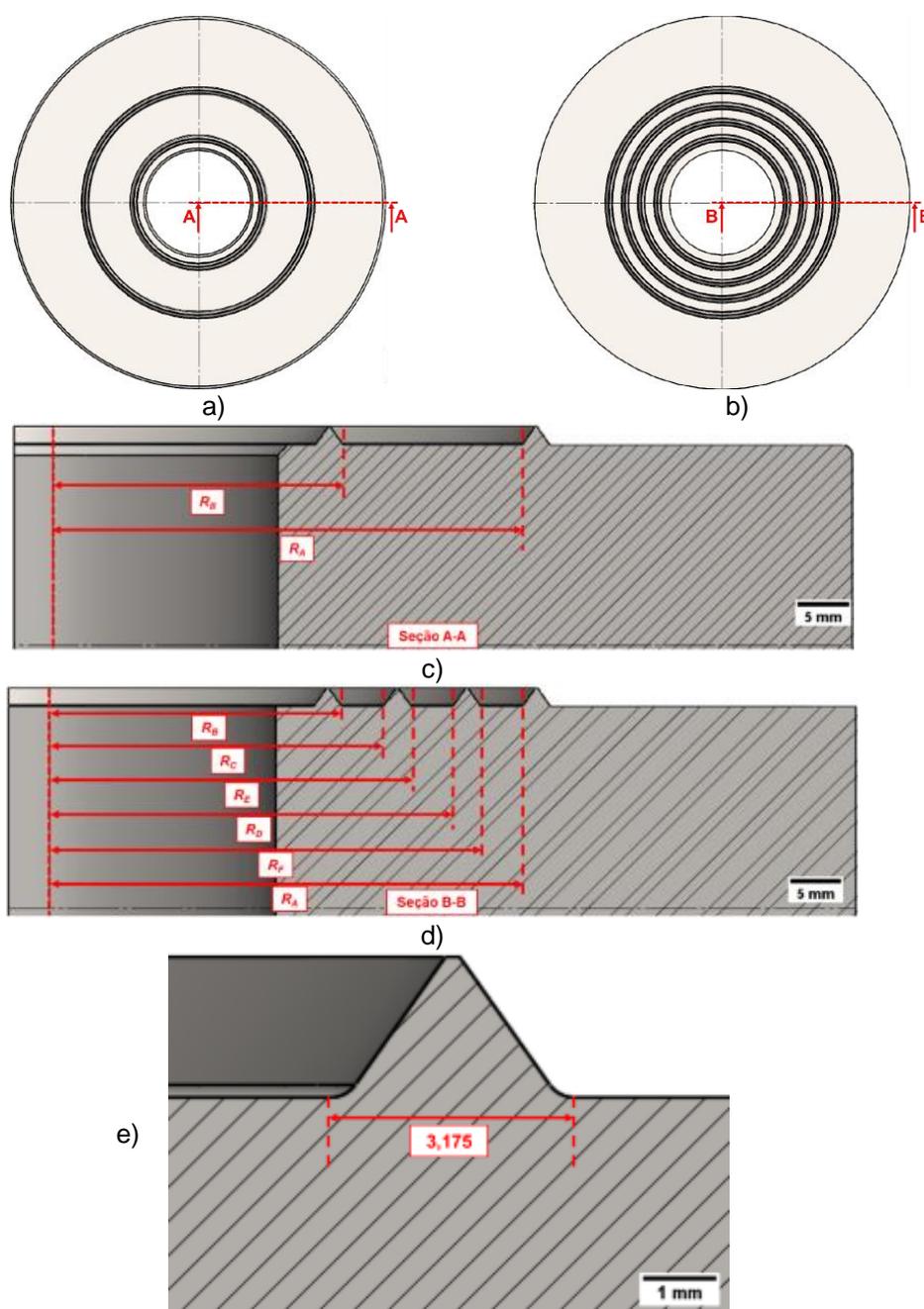
Figura 33 - Canais de vedação para 4 *wickers*



Fonte: O autor

A Figura 34 representa as seções e os valores dos raios referentes aos diâmetros ( $\phi_A, \phi_B, \phi_C, \phi_D, \phi_E$  e  $\phi_F$ ) apresentados nas Equações de 5 a 8. Os valores 3,175 somados e subtraídos dos diâmetros nas Equações da Tabela 8, correspondem a dimensão da base dos perfis triangulares paralelos (*wickers*), conforme apresentado na Figura 34 (e).

Figura 34 - Raios dos diâmetros: a) Corte A-A, b) Corte B-B, c) Seção A-A (2 wickers), d) Seção B-B (4 wickers), e) base dos perfis triangulares paralelos. Dimensões em mm.



Fonte: O autor

A Força Efetiva para os CPs com 4 *Wickers* e 3 canais de vedação foi determinada por meio da Equação 9, onde o somatório das forças por pressão foram subtraídos da força do atuador hidráulico.

$$\text{Força Efetiva Total}_{4\text{ wickers}} = \text{Força Atuador} - \sum \text{Força por Pressão } (FP_1, FP_2, FP_3) \quad (9)$$

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

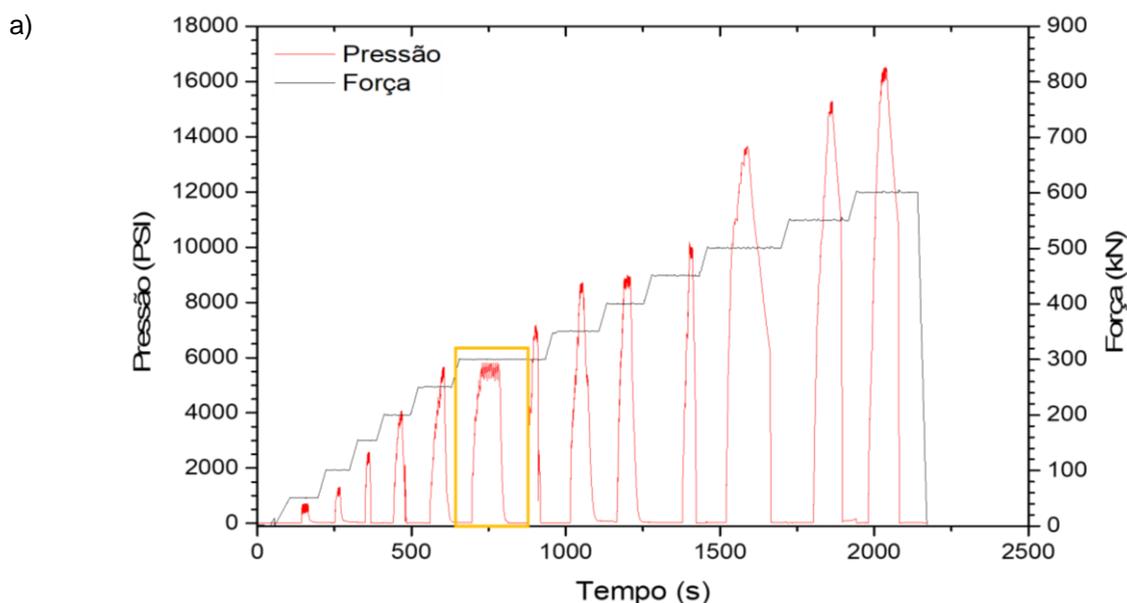
Os dados obtidos com os experimentos foram representados por meio de diagramas de comando e resultados, sendo eles:

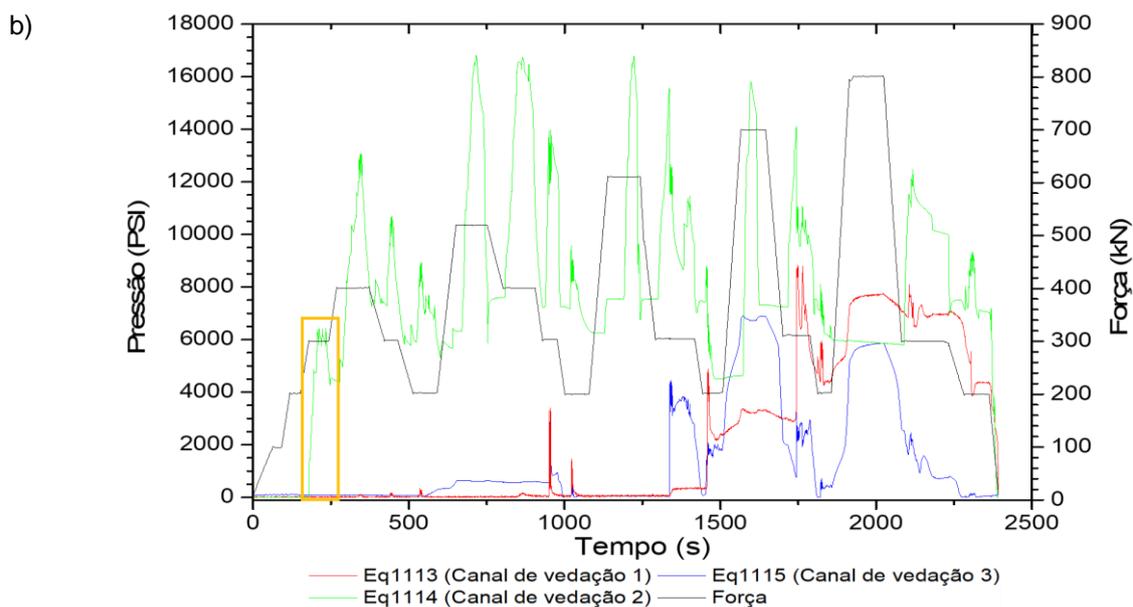
- Comando: Força, Pressão X Tempo;
- Resultado: Força Efetiva, Pressão X Deslocamento; Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo.

#### 4.1.1. Diagramas de Comando

Na Figura 35 são apresentados os experimentos com 2 *wickers* (1 canal de vedação) e 4 *wickers* (3 canais de vedação). Nesses diagramas são relacionados os parâmetros de força do atuador e pressão com o tempo de ensaio. Também é possível identificar os patamares de pressões e forças durante o os testes. Tais diagramas foram gerados com os dados das amostras 205 (2 *wickers*) e 305 (4 *wickers*), devido a uniformidade das respostas de tais amostras, onde os patamares de força e pressão foram mais evidentes. Os gráficos das demais amostras estão dispostos no APÊNDICE B deste trabalho.

Figura 35 - Gráfico de comando (Força, Pressão X Tempo): a) 2 *wickers*, b) 4 *wickers*

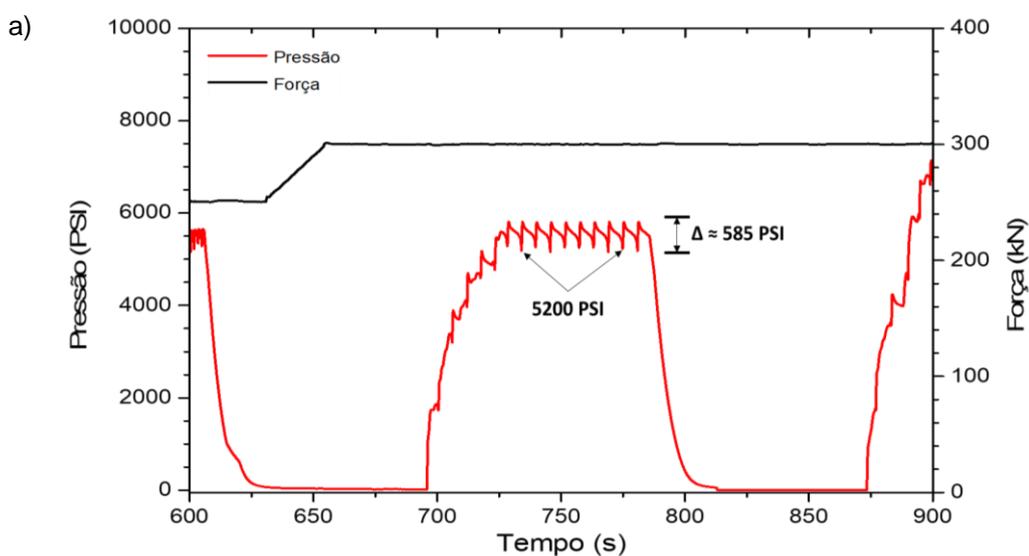


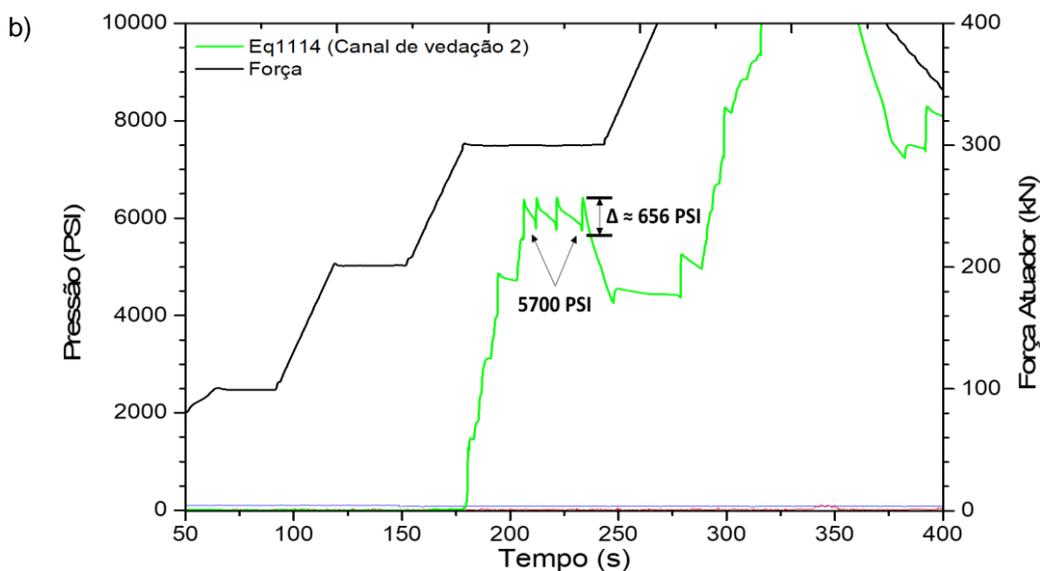


Fonte: O autor

Nos CPs de 4 *wickers*, o canal de vedação 2 (Eq. 1114) possibilita a obtenção dos maiores valores de pressão, maiores que 8250 PSI (curva verde da Figura 35 (b)). As regiões destacadas na Figura 35 exemplificam dois patamares, não apresentaram vazamentos, de forças e pressões para 2 e 4 *wickers*, respectivamente. A Figura 36 apresenta uma ampliação destes intervalos. Nela é possível identificar os momentos em que a força de 300 kN resultou em estanqueidade nas pressões de, aproximadamente, 5200 PSI (Figura 36 (a)) e 5700 PSI (Figura 36 (b)).

Figura 36 - Patamar de Pressão e Força ampliado: a) 2 *wickers* b) 4 *wickers*

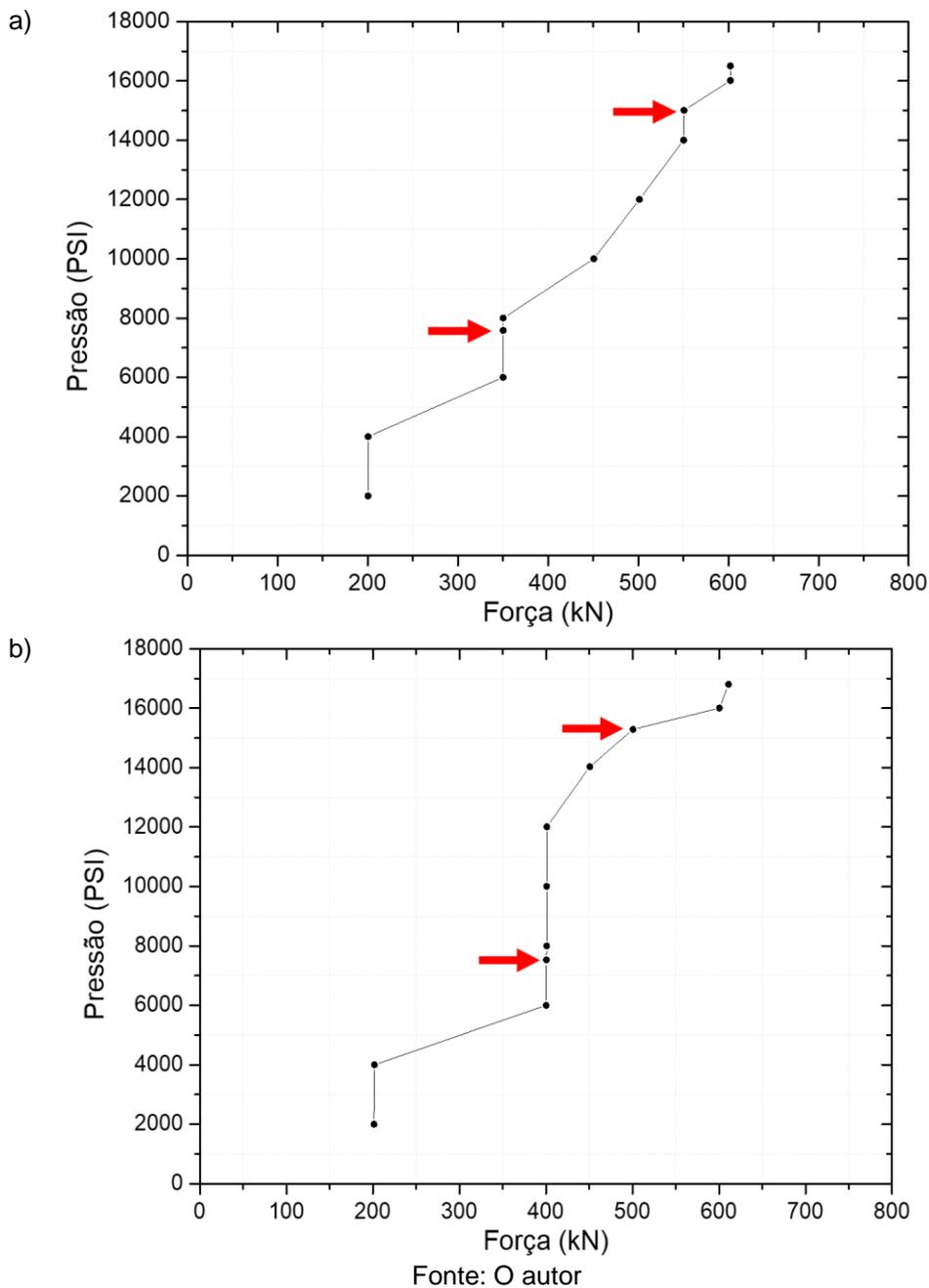




Fonte: O autor

As diferenças médias, representadas pela letra delta ( $\Delta$ ), de 585 PSI (Figura 36 (a)) e 656 PSI (Figura 36 (b)) entre o pico e vale, ocorreram devido a ajustes da pressão resultantes de vazamentos quando tentou-se atingir pressões maiores que 5200 e 5700 PSI, respectivamente. Com os dados apresentados nos diagramas das Figuras 35 e no APÊNDICE B foram gerados os gráficos da Figura 37 para 2 e 4 *wickers*, respectivamente. Essas figuras mostram o comportamento semelhante de todas as amostras durante a aplicação de carga axial (carregamento) e pressão, sendo uma compilação de dados. Os pontos de pressão de 7500 e 15000 PSI estão destacados por serem as pressões limites (pressão de trabalho) para componentes de cabeça de poço submarinas, em especial para o CUV, os quais podem suportar pressões de 7500 PSI quando aplicada por baixo de seus componentes e 15000 PSI quando aplicada por cima. Os valores de força e pressão apresentados nos diagramas das Figuras 37 estão descritos detalhadamente na Tabela 9.

Figura 37 - Compilados de Pressões e Forças: a) 2 *wickers* b) 4 *wickers*



Observando a Figura 37 é possível perceber que a força necessária para atingir 7500 PSI é cerca de 50 kN menor para os CPs com 2 *wickers* (350 kN) em relação aos CPs de 4 *wickers* (400 kN), diferentemente da força para pressões de 15000 PSI, nas quais a força nos CPs de 2 *wickers* é 50 kN maior (550 kN e 500 kN para 4 *wickers*). Tal fato acontece, pois para o surgimento da deformação plástica e início da

estanqueidade no canal de vedação 2 é necessária que seja aplicada uma força de maior magnitude, conforme pode ser observado na Figura 35 (b).

A análise das curvas, permite concluir que para pressões de 2000 e 4000 PSI a força para promover a estanqueidade das amostras é em torno de 200 kN em ambos os casos. Em pressões entre 6000 e 8000 PSI, as amostras com 4 *wickers* apresentaram uma força maior (400 kN) em relação as amostras com 2 *wickers* (350 kN). Esse comportamento não se repetiu para pressões acima de 8000 PSI, em que nos CPs de 4 *wickers* a força de 400 kN permaneceu constante até 12000 PSI, o que não é evidenciado nas amostras com 2 *wickers*, onde houve aumento da força (de 350 kN para 500kN). Entre 12000 e 14000 PSI, a força aplicada em CPs com 2 *wickers* foi 100 kN maior em relação aos CPs com 4 *wickers*. Nas pressões de 16000 PSI, o carregamento aplicado apresentou o mesmo valor (600 kN).

Tabela 9- Valores Força e Pressão

N° de wickers			
2		4	
Pressão [PSI]	Força [kN]	Pressão [PSI]	Força [kN]
2000,46	200,36	2000,79	201,15
4004,68	200,36	4000,83	201,67
6003,28	350,18	6000,83	400,05
<b>7585,44</b>	<b>350,22</b>	<b>7530,59</b>	<b>400,53</b>
8003,18	350,26	8001,33	400,74
10002,10	450,81	10006,72	400,74
12002,85	501,28	12009,71	400,92
14001,72	550,41	14034,43	450,71
<b>15007,72</b>	<b>550,82</b>	<b>15288,97</b>	<b>500,65</b>
16013,11	602,17	16005,90	600,54
16503,85	602,17	16807,77	610,88

Estes comportamentos mostram que ocorre estanqueidade para 7500 PSI nas amostras com 2 *wickers* com uma menor força, porém esta deve ser aumentada para atingir-se maiores pressões. Isso ocorre, pois, a força gerada pela pressão é maior nos CPs com 2 *wickers* gerando um afastamento das superfícies e possibilitando vazamentos. Diferentemente dos CPs com 4 *wickers*, onde a mesma força (400 kN) possibilitou a estanqueidade em pressões de 6000 a 12000 PSI, resultado da menor força devido à pressão nestes CPs.

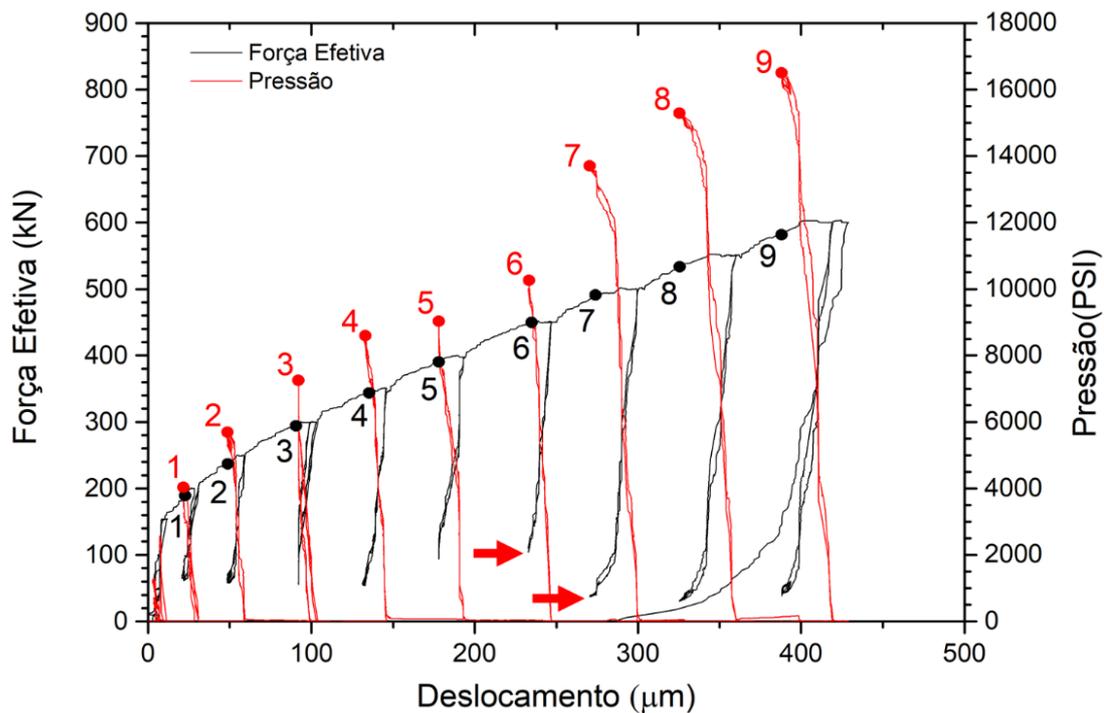
#### 4.1.2. Diagramas de Resultado

Os gráficos dos resultados foram gerados relacionando os parâmetros de força efetiva, deslocamento, pressão e tempo de execução, de forma que a força efetiva ( $FE$ ) foi determinada por meio das Equações apresentadas na Tabela 8 (item 3.2.88 Cálculo da Força Efetiva), para ambos casos (2 e 4 *wickers*). A Figura 38 apresenta o diagrama de resultado dos experimentos com 2 *wickers*. A estanqueidade das amostras foi alcançada para os valores de força efetiva apresentados, onde o aumento da pressão resultou em vazamento.

O aumento da força efetiva para 500 kN permitiu a estanqueidade das amostras para pressões acima de 12000 PSI, visto que tal carregamento ocasionou uma deformação plástica suficiente para ocorrer a vedação metálica dos componentes. Essa deformação, no elemento de menor dureza (*blank*), ficou evidenciada pelo deslocamento de 270  $\mu\text{m}$  (ponto 7 da Figura 38). Com tal deformação, a perda de estanquidade ocorreu em um valor menor que 50 kN de força efetiva. Para a força anterior (450 kN, ponto 6), o conjunto perde estanqueidade numa força efetiva ligeiramente acima de 100 kN, valores esses indicados pelas setas vermelhas na Figura 38.

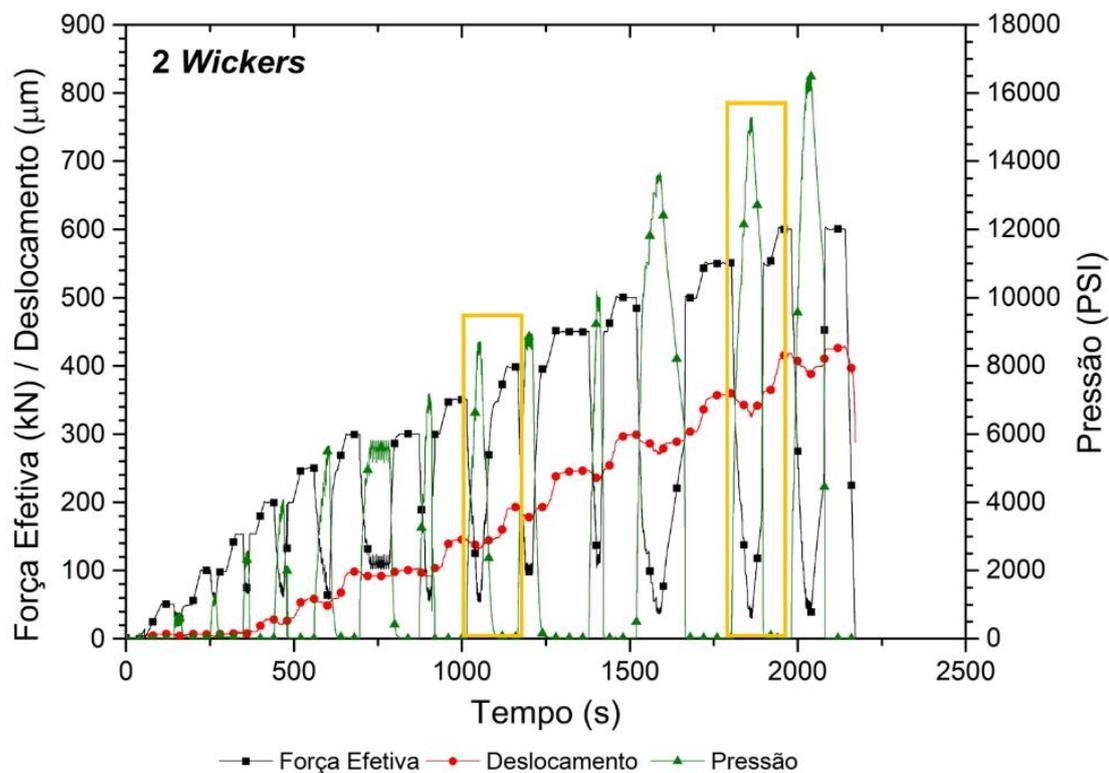
Foi possível obter ainda, para os CPs de 2 *wickers*, os valores em relação ao tempo, conforme Figura 39. Nela estão sinalizadas as regiões de interesse que foram ampliadas na Figura 42 (a), sendo essas as regiões em que se chegou a valores de 7500 e 15000 PSI, pressões importantes para Conjuntos de Vedação Universais.

Figura 38 - Diagrama de resultado (Força Efetiva, Pressão X Deslocamento) 2 *wickers*



Fonte: O autor

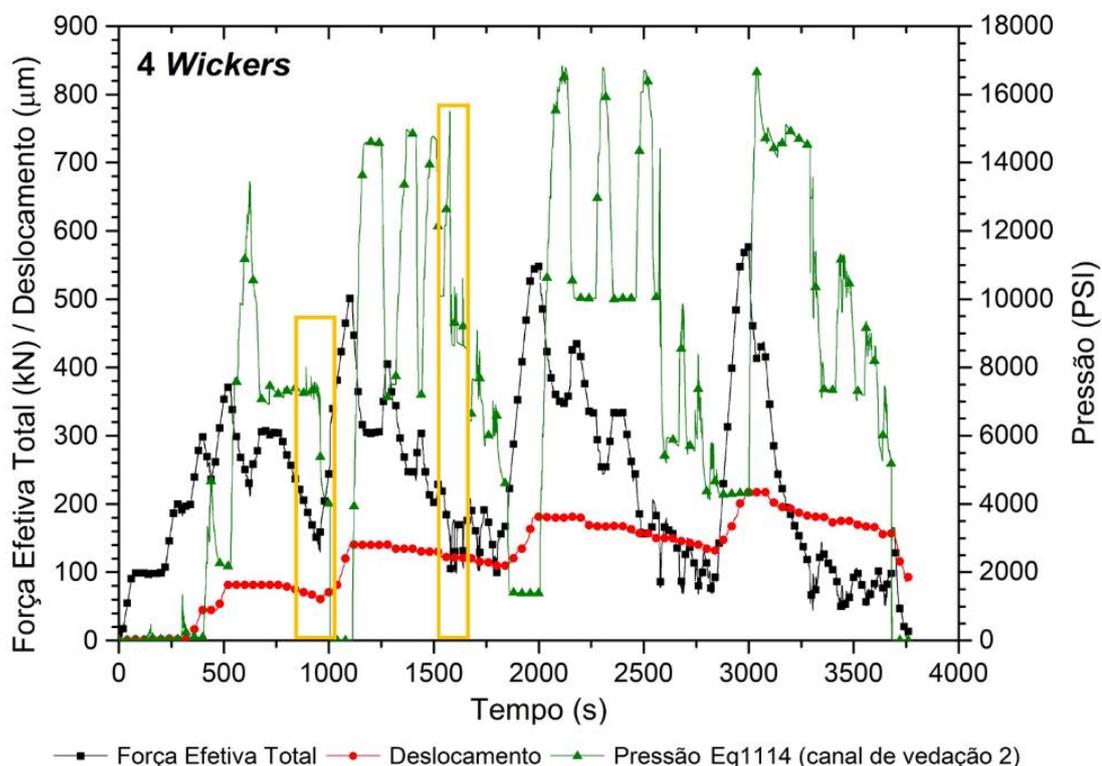
Figura 39 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) 2 *wickers*



Fonte: O autor

Nas amostras com 4 *wickers*, o valor de *Força Efetiva Total* foi determinado por meio da Equação 9. Assim sendo, as pressões registradas nos canais de vedação foram utilizadas nos diagramas de resultados desses CPs, os quais são observados na Figura 40, com destaque também para as regiões de interesse ampliadas conforme os mesmos critérios anteriormente citados. Para fins de comparação, é apresentada a Figura 41, onde são apresentados os valores de Força Efetiva Total (Equação 9) e Força Efetiva 2<sup>6</sup>, onde é possível perceber que existe uma pequena diferença entre estas forças, mostrando que o canal de vedação 2 é o responsável por permitir a estanqueidade nas maiores magnitudes de pressão.

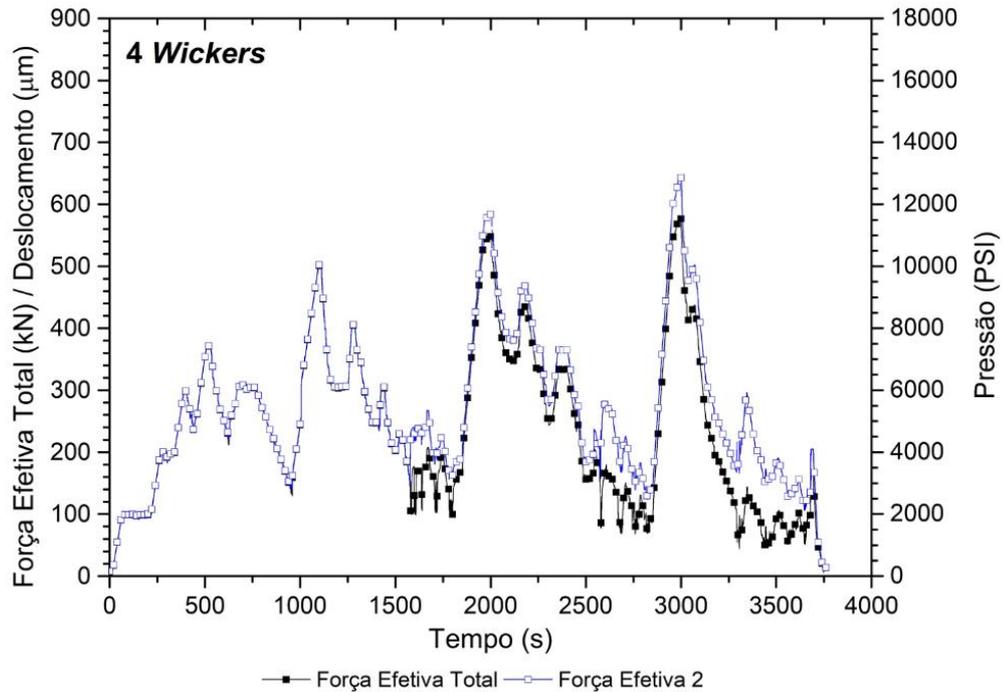
Figura 40 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) 4 *wickers*



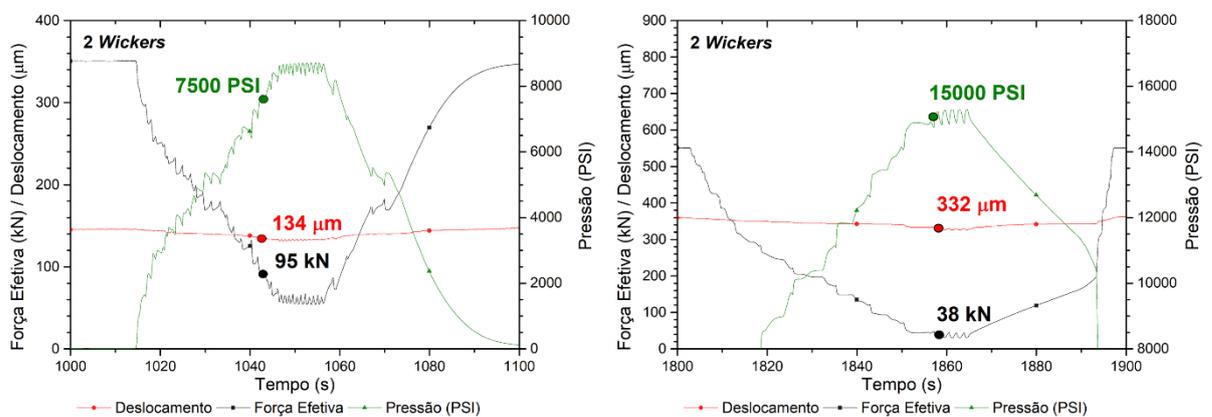
Fonte: O autor

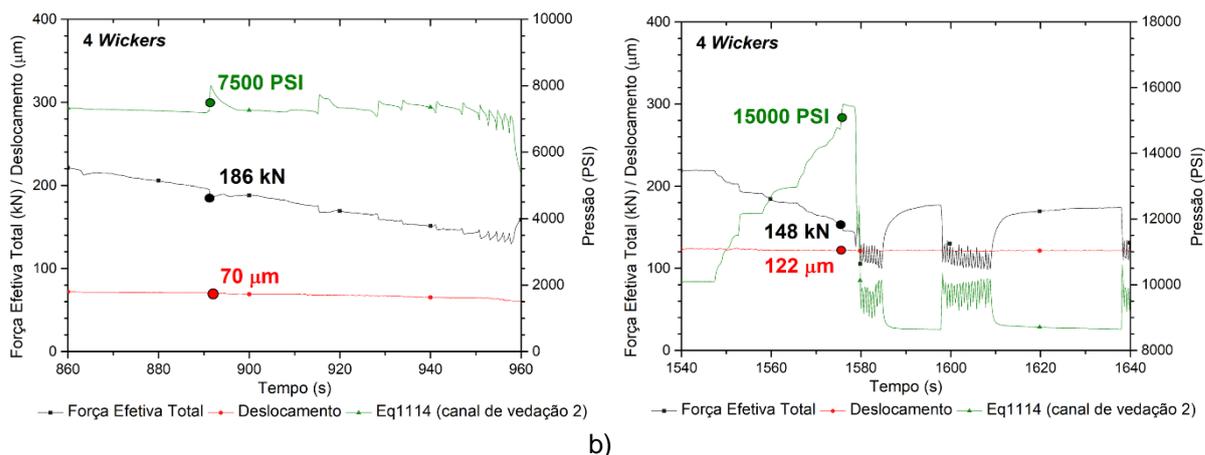
<sup>6</sup> Determinada por meio da equação:  $\text{Força Efetiva}_2 = \text{Força Atuador} - FP_2$  (Equação 7).

Figura 41 - Comparação entre Força Efetiva Total e Força Efetiva 2



Nota-se, pela Figura 40, que o valor máximo de deslocamento para essa configuração de teste, medidas com *LVDT*, nos CPs de 4 *wickers* foi de 217  $\mu\text{m}$ , ou seja, 49% menor em relação aos 426  $\mu\text{m}$  aferidos nos CPs com 2 *wickers*. Para comparação dos resultados, foi elaborada a Figura 42. Nela, as regiões de interesse destacadas nas Figuras 39 e 40 foram ampliadas. Apresentam-se assim os valores de pressão, deslocamento e força efetiva, para as pressões de 7500 PSI e 15000 PSI.

Figura 42 - Gráficos Comparativos: a) 2 *wickers* b) 4 *wickers*



Fonte: O autor

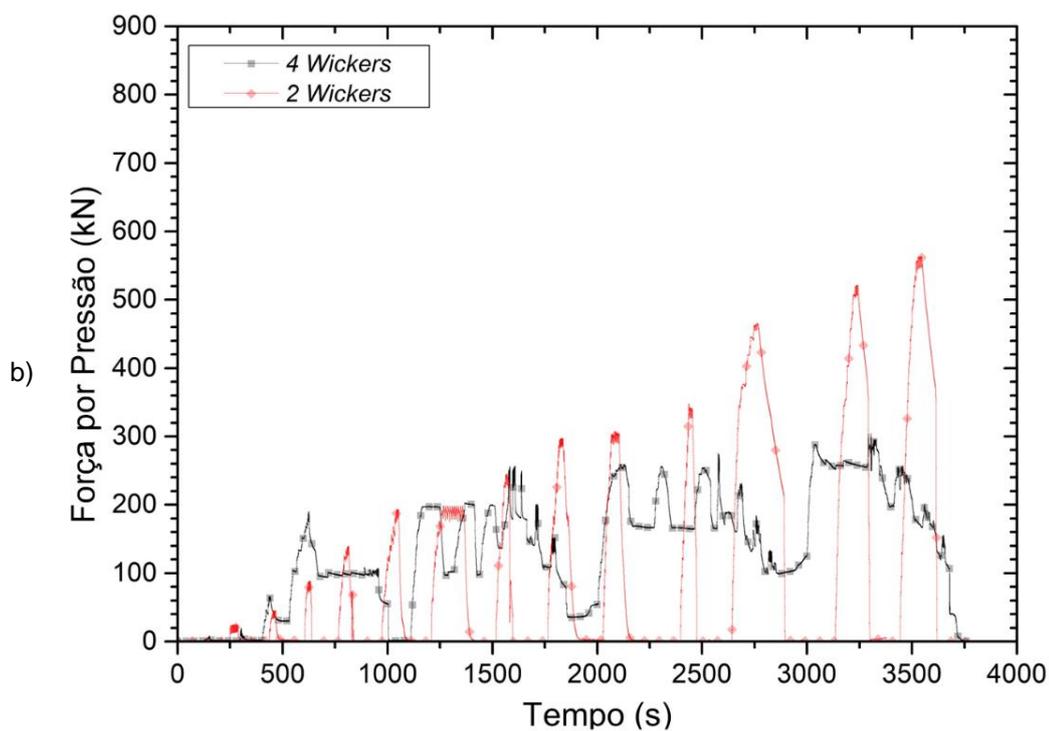
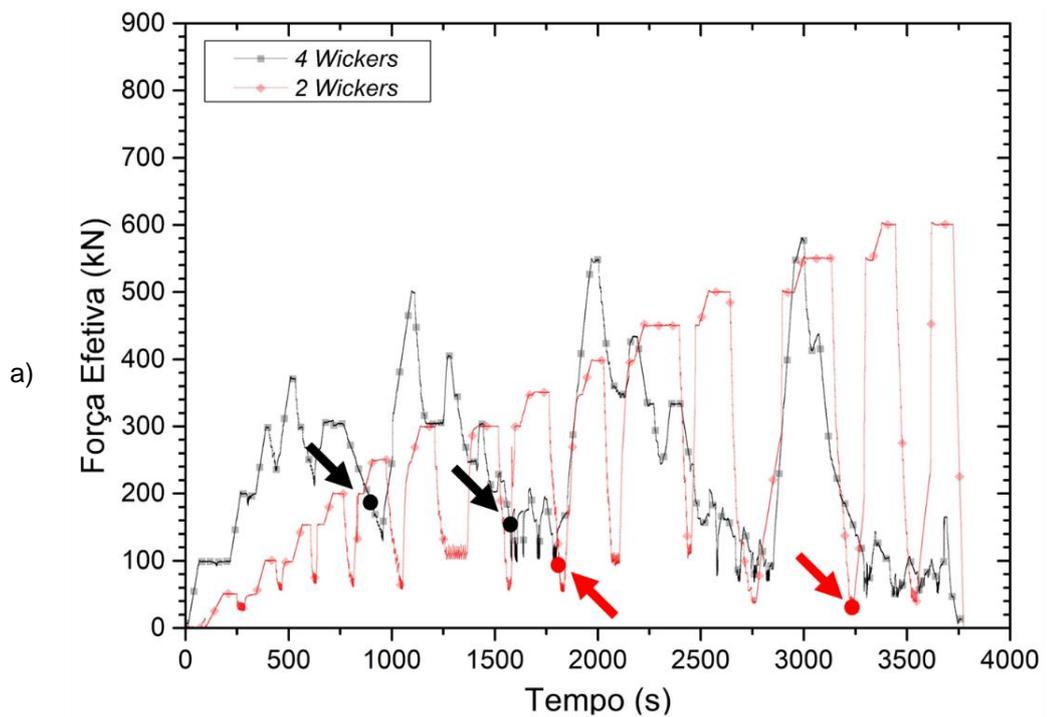
Percebe-se que para 4 *wickers*, o deslocamento necessário para atingir as pressões de interesse é menor em relação aos CPs com 2 *wickers*, sendo 47% menor para as pressões de 7500 PSI e 63% para pressões de 15.000 PSI. Em relação a força efetiva (*FE*), para ambos os casos (2 e 4 *wickers*), ocorreu uma redução de valor quando a pressão aumentou de 7500 para 15000 PSI. Isso ocorre pois o aumento da pressão acarreta um aumento da força por pressão (*FP*), a qual opõe-se à força exercida pelo atuador hidráulico. Também se notou que a força efetiva para os CPs com 4 *wickers* foi maior para ambas as pressões (7500 e 15000 PSI). Os valores de força efetiva (*FE*) para os CPs com 4 *wickers* foram maiores devido a dois fatores:

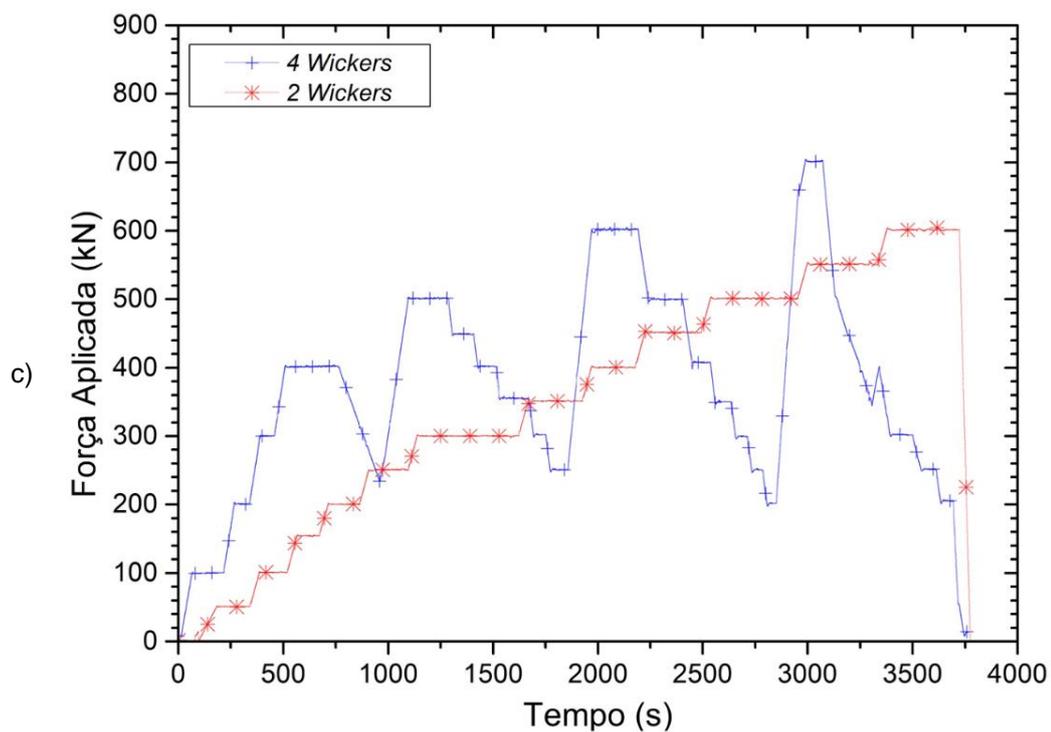
1º. Área de aplicação da pressão ser menor, isso ocasionou uma menor força por pressão (*FP*), pois de acordo com a Equação 3, quanto maior a área maior a força devido à pressão (Figura 43 b);

2º. Força aplicada pelo atuador hidráulico ser maior para possibilitar estanqueidade com aumento da pressão (Figura 43 c).

A Figura 43 apresenta as relações entre forças efetivas, forças por pressão e força aplicada em função do tempo para as duas configurações de ensaios. As setas em (a) indicam os valores de *FE* para as duas faixas de pressão e as duas configurações dos CPs.

Figura 43 - Gráficos, a) Força Efetiva X Tempo, b) Força por Pressão X Tempo, c) Força Aplicada X Tempo





Fonte: O autor

Os valores de Força Efetiva e Força Efetiva Total foram analisados por meio de modelos numéricos e comparados com os resultados experimentais, tais comparações e valores de pressão, força e deslocamento são apresentados no Anexo A deste trabalho.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar por meio de teste em escala reduzida a influência da aplicação de carregamento combinado em vedações metálicas com perfis triangulares paralelos (*wickers*). Foram ensaiadas 2 configurações de CPs, uma com 1 canal de vedação e outra com 3 canais de vedação, contendo 2 e 4 *wickers*, respectivamente.

Os diagramas de comando possibilitaram verificar que para força de 300 kN, resultou em estanqueidade de 5200 PSI para os CPs de 2 *wickers* e de 5700 PSI para os CPs de 4 *wickers*. Também se percebeu que nas pressões de 7500 a força aplicada nos CPs de 2 *wickers* é 50 kN menor em relação aos CPs com 4 *wickers*. Já, para pressões de 15000 PSI a força nos CPs de 4 *wickers* é 50 kN menor. Estas diferenças ocorreram devido a necessidade de uma maior força para surgimento da deformação plástica inicial nos CPs de 4 *wickers*.

Os diagramas de resultado apresentaram dados para 7500 PSI e 15000 PSI, onde os deslocamentos para os CPs de 4 *wickers*, mensurados por meio do *LVDT*, foram 47% menor para as pressões de 7500 PSI e 63% para pressões de 15000 PSI. Já a força efetiva para tais CPs foi maior, devido ao tamanho reduzido das áreas de seus canais de vedação.

Diante do exposto acima, conclui-se que para pressões menores que 7500 PSI os CPs com 2 *wickers* possibilitam melhores estanqueidades, pois necessitaram de menor força para que haja deformação plástica. Já para faixas de pressões de 7500 PSI a 12000 PSI, os CPs com 4 *wickers* foram melhores, pois não necessitaram de incrementos de força, a qual permaneceu constante em 400 kN. Para pressões acima de 16000 PSI as forças para ocasionar vedação foram muito próximas (cerca de 600 kN). O deslocamento apresentado pelos CPs com 4 *wickers* evidencia que esta configuração possibilita melhor vedação metálica, necessitando de menor deformação plástica para que a estanqueidade ocorra.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Alterar geometria dos perfis triangulares paralelos (*wickers*) para avaliar a influência de tal geometria na vedação metálica;
- Alterar a dimensão dos canais de vedação para avaliar a influência da Força de Pressão na estanquidade das amostras;
- Aumentar o número de canais de vedação e verificar a influência desta alteração;
- Modificar os CPs para utilização de outro método de medida de deslocamento, utilizando sensor diferente do *LVDT*;
- Aprimorar o método de alinhamento dos CPs evitando idetações (deformações plásticas) desalinhadas;
- Realizar estudo da rugosidade superficial das amostras.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINI, C.; MIURA, K.; YAMAMOTO, M. The Application and Functionalities of a Wet Christmas Tree Applied in Santos Basin Pre-Salt Cluster. **JASNAO Annual Meeting**, p. 77-80, nov. 2017.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 17D**: Specification for Subsea Wellhead and Tree Equipment. 3rd ed. API, 2021.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 17TR8**: HPHT Design Guideline for subsea Equipment. 2nd ed. API, 2022.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPEC 6A**: Specification for Wellhead and Christmas Tree Equipment. 20nd ed. API, 2010.

BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Engineering Handbook**. 2. ed. Cambridge: Gulf Professional Publishing: 2019. ISBN 978-0-12-812622-6.

BARCELOS, J. G. A. **Modelagem matemática do aumento de pressão nos anulares (APB) em poços de petróleo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

BEN, **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**, ano base 2021. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2022. Versão *online*. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022/>>. Acesso em: 15 out. 2022.

BLIZZARD, W. A.; CAMCO Inc. Metallic Sealing Technology in Downhole Completion Equipment. **Offshore Technology Conference**. Houston, mai. 1989.

BOEHM Jr, C.F.; HOSIE, S.; VECTO GRAY Inc. Metal Annulus Seals for Subsea Wellheads: Important Systems Considerations. **Offshore Technology Conference**. Houston, mai. 1990.

BOEHM, C.F.; MILBERGER, L. J.; VECTO GRAY Inc. High-Performance Metal-Seal System for Subsea Wellhead Equipment. **Offshore Technology Conference**. Houston, mai. 1989

BROWN, L.; WITWER, B. Next Generation HP/HT Wellhead Seal System Validation. **Offshore Technology Conference**. Houston, mai. 2017.

CAI R.L.; GU B.Q.; SONG P.Y. Process Equipment Sealing Technology. **Chemical Industry Press**, p. 77-78, 2010.

CHEN, Y.; LIANG, T.; PENG, X.; YU, H. Calculation and analysis of the first interface micro-gaps of the thermal production wells. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 1-9, 2017. DOI: 10.1177/1687814016688586

CHO, J. R.; JOO, B. D.; CHO, J. R.; MOON, Y. H. Finite element analysis of the offshore reel-laying operations for double-walled pipe. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 10, p. 1-10, 2017. DOI: 10.1177/1687814017731226

DANNER B. L., HENDERSON H.O., VETCO GRAY Inc. Development Incorporating of an Advanced Subsea Wellhead System All Metal-to-Metal Sealing. **Offshore Technology Conference**. Houston, mai. 1990.

DORT, R. Metal-to-metal seals meet downhole hazard demands. **Journal of Petroleum Technology**. Dyce, n. 61, p. 24-26, jan. 2009.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Fontes de energia**. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/fontes-de-energia/>. Acesso em: 12 out. 2022.

FLITNEY, R. **Seals and sealing handbook**. Waltham: Elsevier, 2014. 637 p. ISBN: 978-0-08-099416-1.

FROUFE, L. M. **Análise comparativa de critérios de dimensionamento de risers rígidos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GARCIA, J. E. de L. **A Completação de Poços no Mar**. 1997. 164 p. Apostila SEREC/CEN-NOR.

GARFIELD, G.; MACKENZIE, G. Metal-to-metal sealing technology: bridging the gap between conventional and high expansion zonal isolation applications. **Baker Oil Tools, Society Of Petroleum Engineers**, The Woodlands, mar. 2007. DOI: 10.2118/107107-MS

HOUAISS, Antônio. **Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2009

IBP, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás. **Produção acumulada de petróleo e reservas provadas por bacia**. 2022. Disponível em: <<https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/producao-acumulada-de-petroleo-e-reservas-provadas-por-bacia/>>. Acesso em: 20 out 2022.

IEA. **World Energy Outlook 2021**. International Energy Agency, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>>. Acesso em: 24 out. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10423**: petroleum and natural gas industries: drilling and production equipment: wellhead and christmas tree equipment. 50th ed. ISO, 2022.

KACULI, J. T.; ENG, D. P. E.; WITWER, B. J. Subsea Wellhead System Verification Analysis and Validation Testing. **Offshore Technology Conference**. Houston, mai. 2014.

KWIETNIEWSKI, C., E., F.; KISS, F., J.; STROHAECKER, T., R.; REGULY, A. **Tratamentos térmicos de aços e ferros fundidos**. 1. ed. Porto Alegre: Gráfica UFRGS, 2014. 349 p.

LAKE, L. W. **Petroleum Engineering Handbook: Drilling Engineering (Vol. II)**. Society of Petroleum Engineers: Richardson, TX 75080-2040 USA, 2007. ISBN 978-1-55563-114-7

LIN, T.; YU, H.; LIAN, Z.; SUN, B. Casing failure mechanism during volume fracturing: A case study of shale gas well. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 8, p. 1-9, 2017. DOI: 10.1177/1687814017717182

MORAIS, J. M. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore**. Brasília: Ipea, PETROBRAS, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1147>>. Acesso em: 21 out 2022.

NORDESTE, WEB LTDA. **Subsea Xmas Tree**. Disponível em: <<https://webnordeste.com.br/en/products/offshore-products/subsea-xmas-tree>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

PERSSON, B. N. J. Relation between Interfacial Separation and Load: A General Theory of Contact Mechanics. **Physical Review Letters**, Jülich, set. 2007.

PETROBRAS. **RIMA - Relatório de Impacto Ambiental: Projetos Integrados de Produção e Escoamento de Petróleo e Gás Natural no Pólo Pré-Sal, Bacia de Santos**. Santos, 2011. 61p. Disponível em: <[https://www.itanhaem.sp.gov.br/rima\\_2011.pdf](https://www.itanhaem.sp.gov.br/rima_2011.pdf)>. Acesso em: 21 out 2022.

RONG, X.; ZHU, H. -W. Thermal insulation design of subsea vertical X-mas tree. **Petroleum Science**, v. 18, n. 4, p. 1182-1194, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.05.001>

ROSA, V. R. **Design optimization of oilfield subsea infrastructures with manifold placement and pipeline layout**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

SCHLUMBERGER, O. S. **Standard Horizontal Subsea Trees**. Disponível em: <<https://www.onesubsea.slb.com/-/media/onesubsea/files/brochure/oss-standard-horizontal-subsea-trees-br.ashx>>. Acesso em: 12 nov. 2022.

SILVA, D. Y. C. A.; FRANCISS R. A completção de poços de petróleo - uma revisão do planejamento das operações e equipamentos. **Revista de Engenharia da**

**Universidade Católica de Petrópolis**, Petrópolis, v. 13, n. 1, p. 26-39, nov. 2019. Disponível em: <https://seer.ucp.br/seer/index.php/REVCEC/article/view/1637>. Acesso em: 12 nov. 2022.

STRAPASSON, A. B. **A Energia térmica e o paradoxo da eficiência energética: desafios para um novo modelo de planejamento energético**. 2004. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TECHNIPFMC, **Subsea Drilling Services**, Houston, 2018. Disponível em: <<https://www.technipfmc.com/en/what-we-do/subsea/life-of-field-services/subsea-drilling-services/>>. Acesso em: 08 ago. 2023.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TIWARI A.; ALMQVIST A.; PERSSON, B. N. J. Plastic deformation of rough metallic surfaces. **Tribology Letters**, n. 68, nov. 2020. DOI: 10.1007/s11249-020-01368-9

UMOFIA, A.; KOLIOS, A. Subsea Production System (SPS)- A Solution to Marginal Offshore Fields Development in the West African Waters. **SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition**, Lagos, 2014, Aug. 2014.

VASCONCELOS, A. L. M. **40 anos na evolução da tecnologia em árvore de Natal molhada no Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VILLELA, M. J. R. **Análise do comportamento da temperatura em sistemas de produção de petróleo: comparação entre completção seca e molhada**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

XIAO, W.; HOU, C.; LIU, J.; LUAN, B.; WANG, H. Structure Optimization and Performance Analysis of Subsea High-Pressure Wellhead Metal Seal. **The Open Mechanical Engineering Journal**, Shandong, v. 9, p. 564-568, jun. 2015. DOI: 10.2174/1874155X01509010564

ZHANG, X.; WANG, G.; XIA, P.; LI, H-P.; HE, M. Finite element analysis and experimental study on contact pressure of hydraulic support bud-shaped composite sealing ring. **Advances in Mechanical Engineering**, v.8, n. 10, p. 1-9, 2016. DOI: 10.1177/1687814016674846

## ANEXO A - SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Para este trabalho, a análise pelo método dos elementos finitos foi desenvolvida por meio do software *ABAQUS*, onde o parâmetro pressão de contato é definido como *CPRESS*. Essa é uma variável de contato que representa a pressão de contato entre duas superfícies em um ponto específico, sendo calculada como uma função da interpenetração das superfícies ou do fechamento (“*overclosure*”) dessas.

Utilizada na análise de contato de duas ou mais superfícies quando submetidas a carregamento. Sua magnitude dependerá de fatores como os elementos de contato utilizados, as interações das superfícies, a existência ou não de atrito durante o contato e a geometria dos corpos. O valor de *CPRESS* será determinado de acordo com a área e a força aplicada.

A análise de esforços e característica de estanqueidade dos CPs, quando submetidos ao carregamento combinado, foi complementada com o desenvolvimento de um modelo numérico. Nesta modelagem bidimensional, os corpos foram considerados rígidos e utilizou-se o modelo de “casca” para avaliação das amostras. As amostras foram consideradas corpos sólidos, homogêneos e isotrópicos. A Tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas dos CPs *wickers*, tais propriedades estão de acordo com as especificações dos aços que os CPs foram confeccionados. A curva de plasticidade destes CPs foi gerada com 2 pontos, pois sua deformação plástica era pequena em relação á ocorrida no outro CP.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas

Corpo de Prova	Aço	Comportamento Elástico		Comportamento Plástico	
		Módulo de Young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Limite de Escoamento (MPa)	Deformação Plástica
<i>Wicker</i>	AISI 8630	210	0,3	634,24	0
				971,24	0,2284

Boehm (1990), estabelece que o material utilizado para o elemento vedante “*seal*” (CP *blank*, neste trabalho), usualmente utiliza-se o aço AISI 1018 ou material similar, com dureza de 120 a 140 HB. Logo as propriedades dos CPs *blank* são semelhantes as deste aço, e sua curva de plasticidade foi confeccionada com 4 pontos.

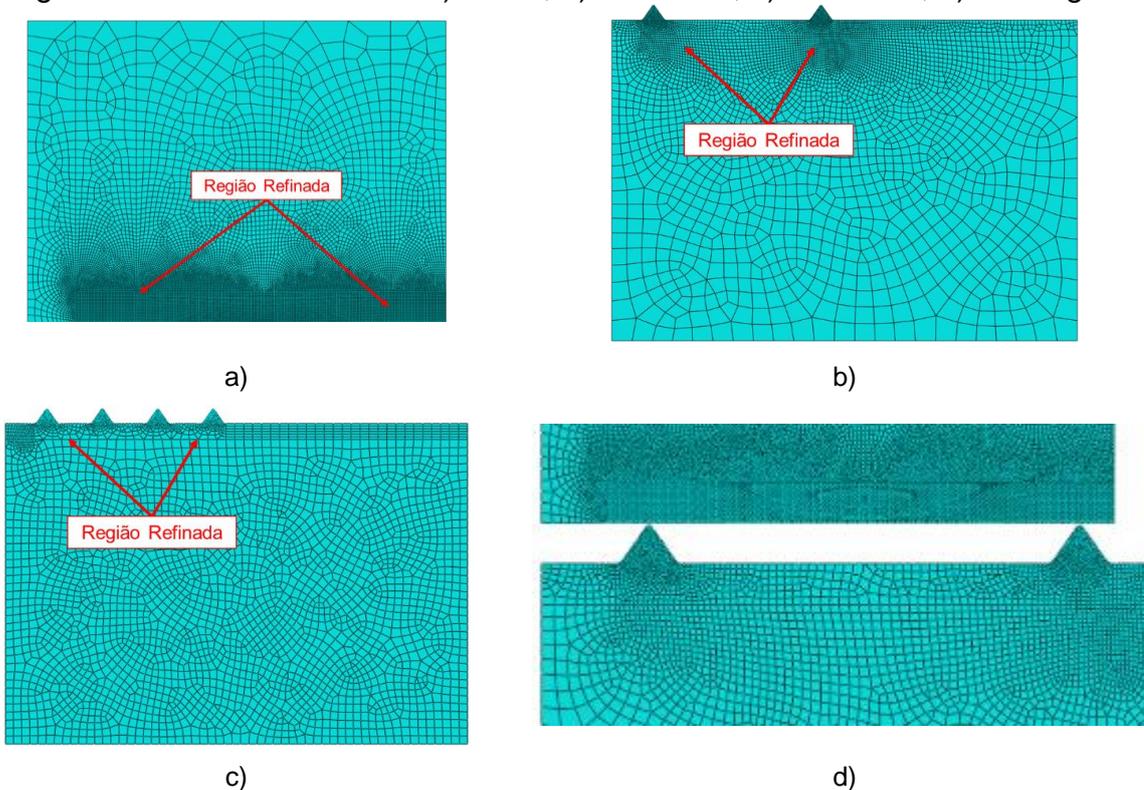
Para a construção da malha, a geometria dos elementos infinitesimais era do tipo CAX4 (sem redução de integração), que compreendiam um quadrilátero axissimétrico com 4 nós, da família de elementos de tensão em duas dimensões, utilizado em modelos de corpos esféricos ou cilíndricos. Tais elementos permitem a transição de tensão em seus interiores, com menor custo computacional e maior estabilidade do modelo numérico.

As quantidades de elementos presentes nas malhas geradas são apresentadas na Tabela 11.

CP	Número de elementos
<i>Blank</i>	16690
<i>Wicker</i>	5665

Com o objetivo de obter resultados coerentes com os experimentos e otimizar os recursos computacionais, a malha foi refinada, ou seja, nas regiões críticas foram gerados mais elementos deformáveis. A Figura 44 demonstra tais regiões.

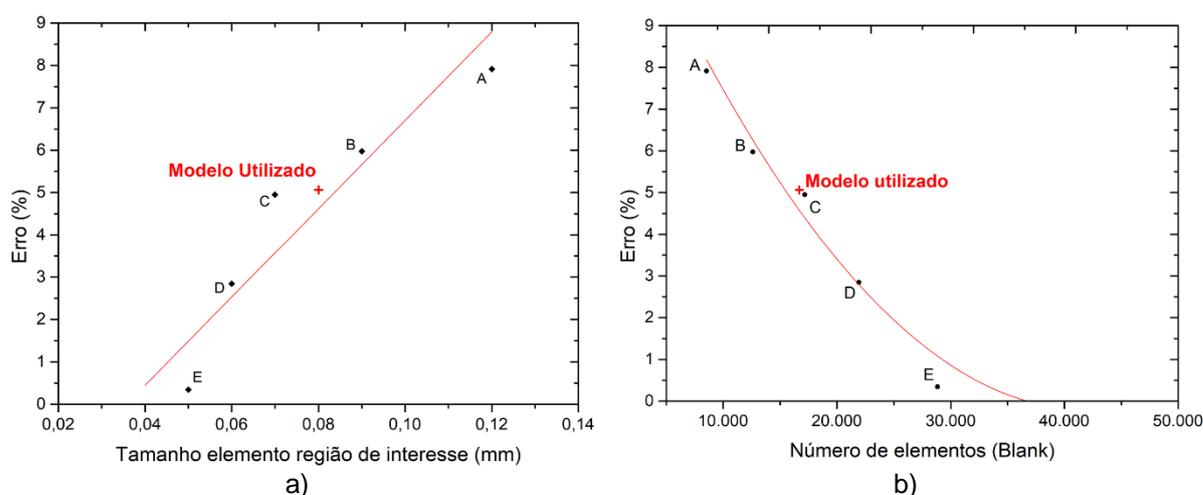
Figura 44 - Refino de malha: a) Blank, b) 2 *wickers*, c) 4 *wickers*, d) montagem



Fonte: O autor.

Estas regiões receberam refino de malha, visto que nelas ocorreram as deformações plásticas causadas pela geometria dos perfis triangulares paralelos (*wickers*), Figura 44 (d). Afim de apresentar as relações entre tamanho de elemento e erro relativo e número de elementos do CP *blank* e erro relativo para diferentes malhas, foram elaborados os diagramas da Figura 45 (a) e (b), respectivamente.

Figura 45 - Diagramas de convergência de malha: a) Erro (%) X tamanho de elemento, b) Erro (%) X número de elementos



\*Erro calculado em relação ao modelo com maior número de elementos e menor tamanho de elementos.

Fonte: O autor

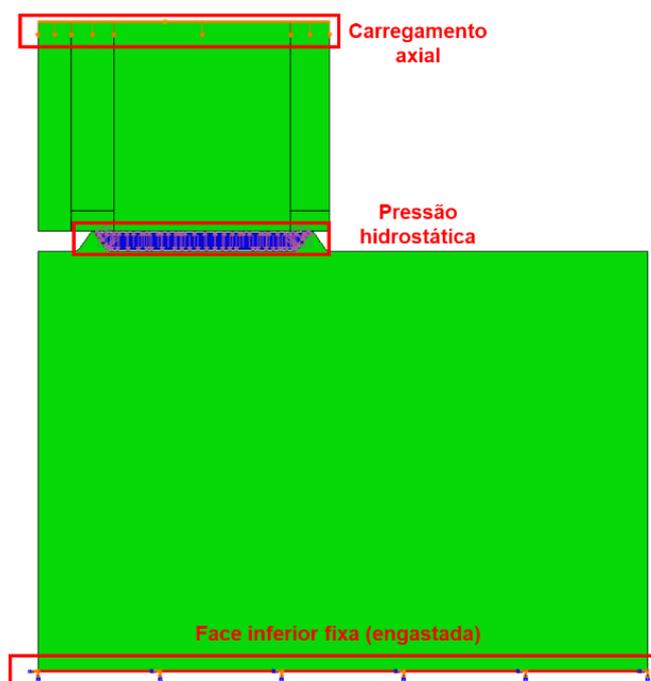
Utilizou-se o modelo numérico destacado nos diagramas da Figura 45 (a) e (b), pois seu erro em relação ao modelo com maior número de elementos e menor tamanho, no CP *blank*, apresentou valores aceitáveis juntamente com um menor tempo computacional. Elementos com menores que 0,04 mm apresentaram distorções na malha, resultando em deformações excessivas.

As condições de contorno de tal simulação computacional, apresentadas na Figura 46, foram:

- Esforço axial (de compressão) aplicado na face superior do elemento *blank*. força aplicada em um Ponto de Referência (RP) com *coupling* em toda superfície apresentada por “carregamento axial” (Figura 46);
- Pressão hidrostática aplicada no canal de vedação formado pelos 2 perfis triangulares paralelos e o *blank*;
- Fixação da face inferior do elemento *wicker*, impedindo qualquer modo de deslocamento, face engastada ( $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$ );

- Propriedades de contato:
  - Contato suavizado por pressão de contato tabular, afim de evitar a interpenetração das superfícies dos componentes;
  - Ausência de atrito na água confinada;
  - Contato metal-metal com coeficiente de atrito de 0,3.

Figura 46 - Condições de contorno



Fonte: O autor

Foram 7 as etapas consideradas na simulação numérica do ensaio em escala reduzida. A Tabela 12 apresenta a descrição de tais etapas.

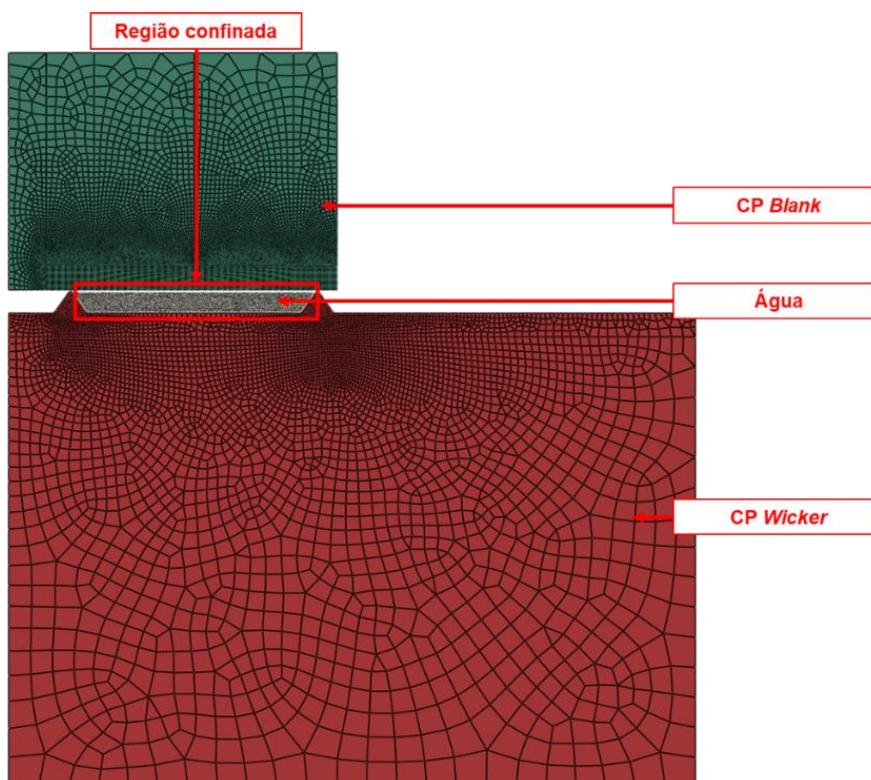
Tabela 12 - Etapas do modelo

Etapa	Descrição
1	Aproximação do CP <i>Blank</i> até o CP <i>Wicker</i> por deslocamento prescrito para garantir contato entre os CP's;
2	Primeiro carregamento;
3	Primeiro patamar de pressão na região confinada entre o CP <i>Blank</i> e o CP <i>Wicker</i> até o vazamento (pressão de contato, "CPRESS" = 0);
4	Redução da pressão na região confinada entre o CP <i>Blank</i> e o CP <i>Wicker</i> para 7251,9 psi e aumento do carregamento;
5	Aplicação do segundo patamar de pressão na região confinada entre o CP <i>Blank</i> e o CP <i>Wicker</i> até o vazamento (pressão de contato, "CPRESS" = 0);

- 6 | Redução da pressão na região confinada entre o CP Blank e o CP Wicker para 7251,9 PSI e aumento do carregamento;
- 7 | Aplicação do terceiro patamar de pressão na região confinada entre o CP Blank e o CP Wicker até o vazamento (pressão de contato, “CPRESS” = 0).

A representação do modelo numérico é mostrada na Figura 47, a qual contém os corpos de prova e a água. A região confinada também está destacada nessa figura.

Figura 47 - CP's, água e região confinada



Fonte: O autor

Para a simulação do elemento água, confinada na região apresentada na Figura 47, foram utilizados elementos com módulo volumétrico ( $K$ ), semelhante ao apresentado por esse fluido. Suas propriedades estão apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Propriedades consideradas para água

Propriedade	Modelo
Módulo de elasticidade [E]	750 MPa
Módulo volumétrico [K]	2500 MPa
Coefficiente de Poisson [ $\nu$ ]	0,45

Onde:  $E = 3.K.(1 - 2\nu)$

## Comparação de Resultados Numéricos e Experimentais

Após a obtenção e análise dos dados experimentais, observou-se uma discrepância entre as medidas registradas por meio do sensor *LVDT* e do relógio comparador. De tais medidas, a obtida através do relógio comparador representa valores reais da deformação plástica sofrida nos CPs, sendo esses considerados para a simulação numérica. A Tabela 14 apresenta os valores médios de deslocamento para os dois equipamentos de medidas utilizados.

Tabela 14 - Correlação de medidas

N° de <i>wickers</i>	Relógio Comparador (mm)	<i>LVDT</i> (mm)
2	0,090	0,426
4	0,030	0,217

A força considerada para a comparação dos resultados de 2 *wickers* foi de 550 kN, pois com tal força obteve-se estanqueidade em 15000 PSI. A Tabela 15 apresenta a comparação entre o valor da simulação numérica e do experimento.

Tabela 15 - Comparativo numérico e experimental da profundidade de penetração residual - 2 *wickers*

Força Efetiva Experimental (kN)	Força Numérica (kN)	Erro (%)	Profundidade de Penetração Experimental (mm)	Profundidade de Penetração Numérica (mm)	Erro (%)
550,41	550	-0,07	0,090	0,0898	-0,22

Nota-se que o modelo numérico apresentou resultados coerentes com os resultados experimentais em relação a profundidade de penetração e força aplicada, indicando uma adequada escolha de propriedades de contato e dos materiais. A Tabela 16, apresenta os valores de profundidade para os CPs de 4 *wickers*.

Tabela 16 - Comparativo numérico e experimental da profundidade de penetração residual - 4 *wickers*

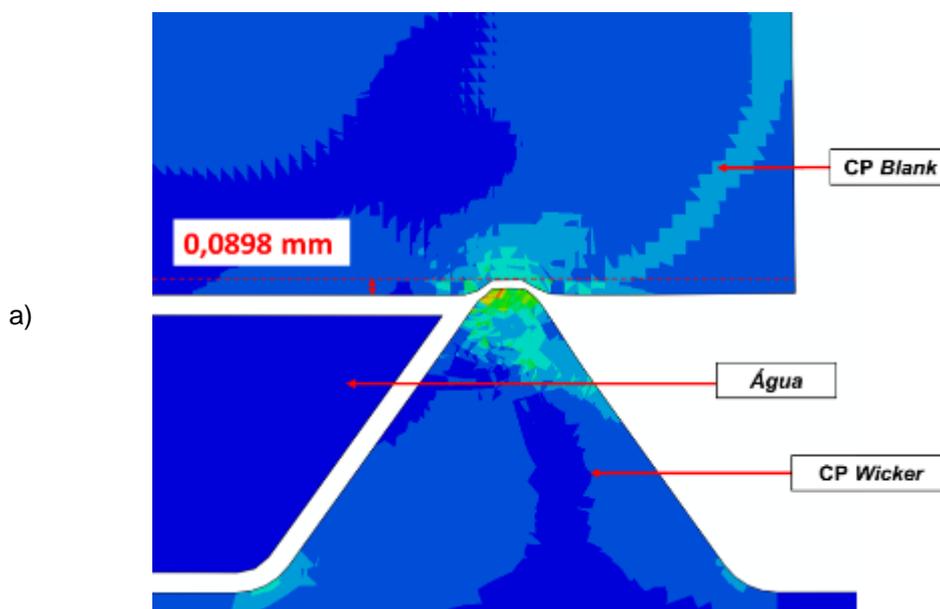
Força Efetiva Experimental (kN)	Força Numérica (kN)	Erro (%)	Profundidade de Penetração Experimental (mm)	Profundidade de Penetração Numérica (mm)	Erro (%)
519,87	520	0,03	0,03	0,0295	-1,67

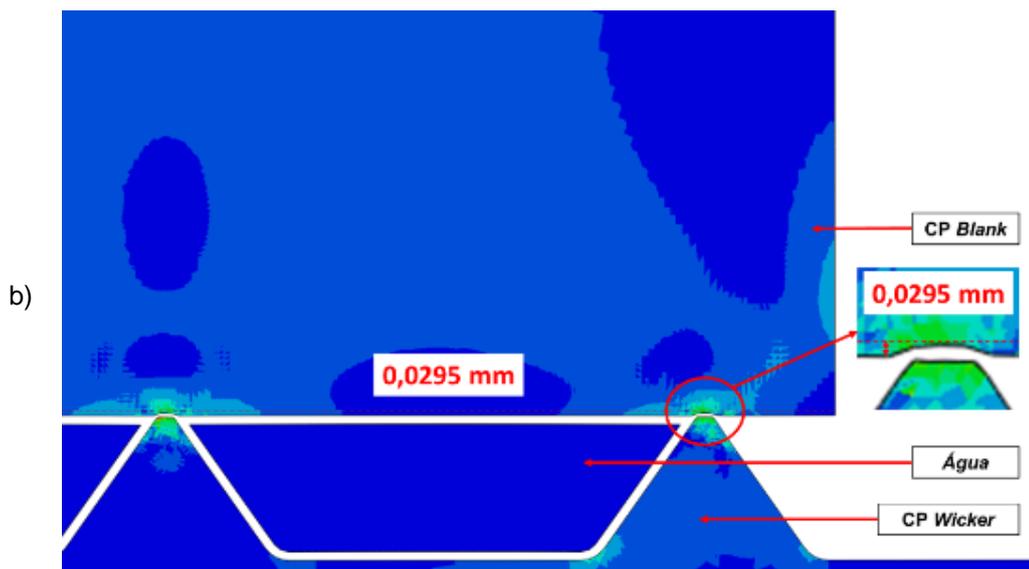
Percebe-se que os valores obtidos com a simulação numérica novamente se apresentaram coerentes com os experimentos. A Figura 48 apresenta as profundidades de penetração para os CPs de 2 e 4 *wickers*.

Em relação a pressão de vazamento, este parâmetro foi considerado quando a pressão de contato entre os CPs foi inexistente, ou seja, nula. A comparação da força aplicada e pressão de vazamento do modelo com o caso experimental para os patamares de pressão pode ser observada na Tabela 17.

Percebe-se que os valores da simulação numérica estão coerentes com os dados experimentais, onde os erros médios para tais patamares de força e pressão de vazamento foram de 0,43% e 3,04%, respectivamente. Com o objetivo de mostrar a coerência dos resultados numéricos e experimentais foi elaborada a Figura 49, onde são apresentadas as curvas das pressões de vazamento da simulação numérica e dos experimentos.

Figura 48 - Profundidades de penetração: a) 2 *wickers*, b) 4 *wickers*



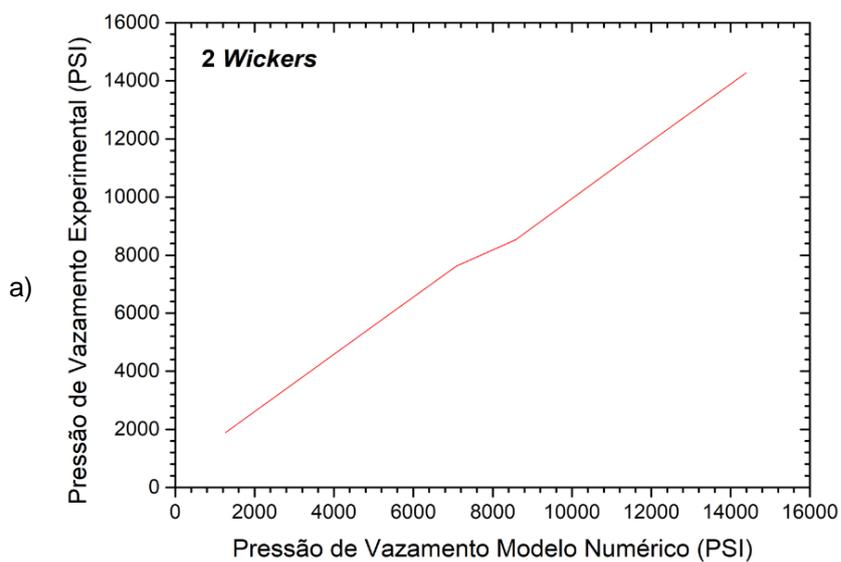


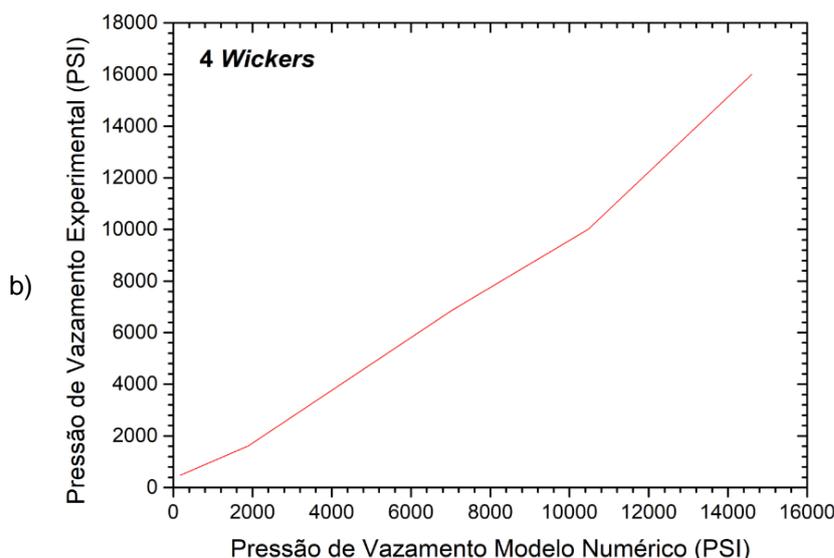
Fonte: O autor

Tabela 17 - Força aplicada e pressão de vazamento por patamar

N° de <i>wickers</i>	Força Efetiva Exp. (kN)	Força Num. (kN)	Erro (%)	Pressão de Vazamento Exp. (psi)	Pressão de Vazamento Num. (psi)	Erro (%)
2	355,78	350,00	-1,62	8.528,20	8.579,00	0,60
	450,79	450,00	-0,18	11.283,90	11.341,97	0,51
	550,41	550,00	-0,07	14.271,70	14.391,40	0,84
4	300,00	300,00	0,00	6.870,00	7.251,85	5,56
	403,00	400,00	-0,74	10.018,65	10.094,58	0,76
	519,87	520,00	0,03	16.406,95	14.772,02	-9,96

Figura 49 -Comparativo de resultados: a) 2 *wickers*, b) 4 *wickers*





Fonte: O autor

Os ângulos de inclinação das curvas apresentadas na Figura 49 (a) e (b) ficaram próximos a 45°, em média 44,67° para 2 *wickers* e 44,24° para 4 *wickers*, mostrando uma relação aceitável entre as pressões de vazamento.

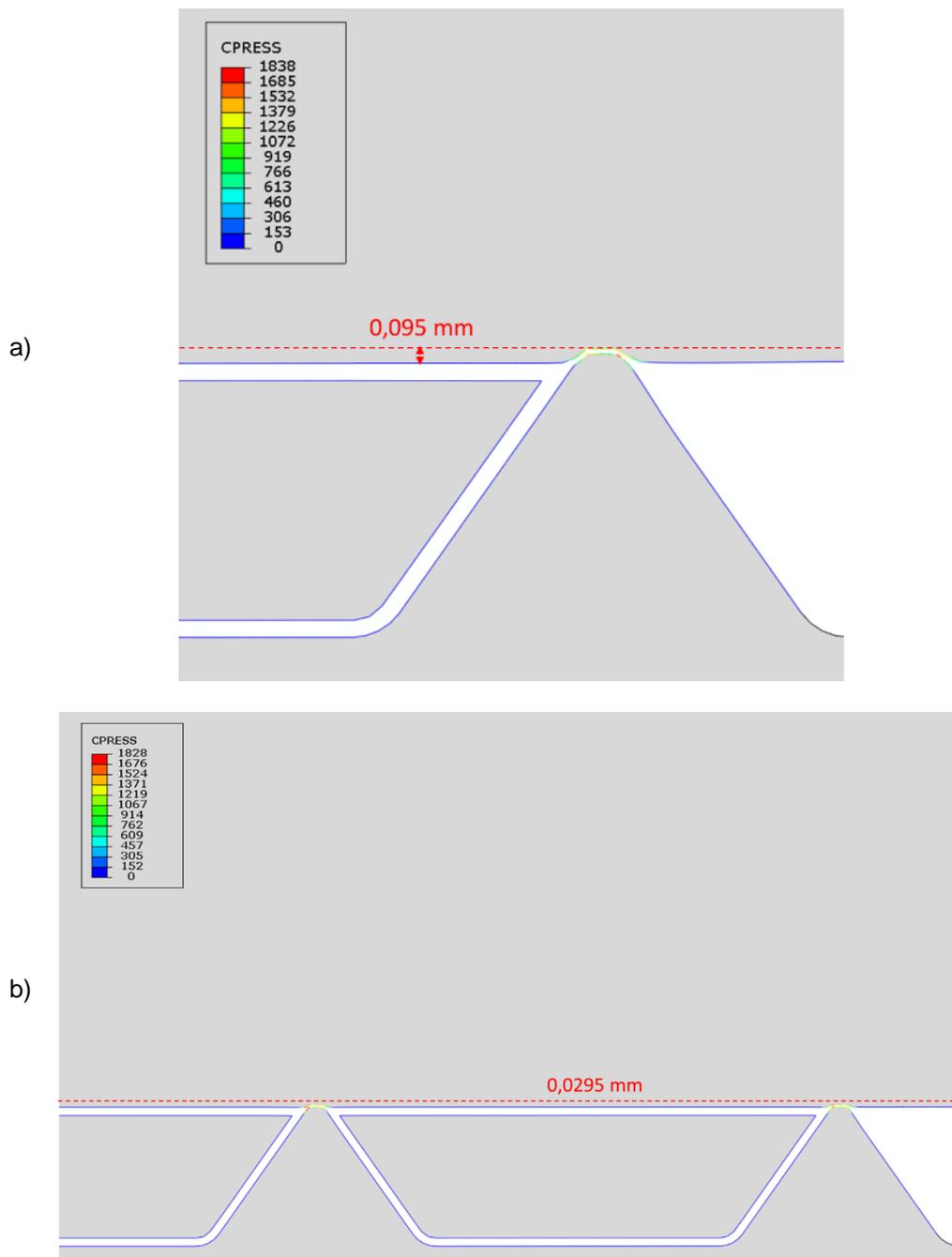
Outra relação feita para mostrar a coerência dos resultados experimentais e numéricos foi a relação de *BIAs*, nela são correlacionados ambos resultados. A divisão dos valores numéricos pelos valores experimentais apresentou resultados de ,91 e 0,9 para os CPs 2 e 4 *wickers*, respectivamente. Mostrando que os resultados estão satisfatórios, tendo em vista que valores mais próximos de 1,0, melhores são os resultados numéricos.

Em relação ao parâmetro pressão de contato (*CPRESS*), os modelos numéricos apresentaram valores muito próximos para as distâncias de cravamento nas duas configurações dos CPs (2 e 4 *wickers*), a Figura 50 mostra tais valores.

Nota-se que os valores das pressões de contato, para tais profundidades de penetração, foram bastante semelhantes, sendo ligeiramente maior nos CPs com 2 *wickers* (1838 MPa) em relação ao CPs com 4 *wickers* (1828 MPa). Tal fato ocorre pois com maior deformação do material, maior é o encruamento.

Em relação ao critério de vazamento, foi estabelecido que pressões de contato abaixo de 492 MPa, nos CPs com 2 *wickers*, resultam em vazamentos em um dos *wickers*. Já nos CPs com 4 *wickers*, o vazamento ocorre quando apenas um dos *wickers* apresentar a pressão de contato de 492 MPa. Esse valor pressão de contato foi atingido quando houve o início da deformação plástica no CP *blank*.

Figura 50 - Pressão de contato para os cravamentos máximos: a) 2 *wickers*, b) 4 *wickers*



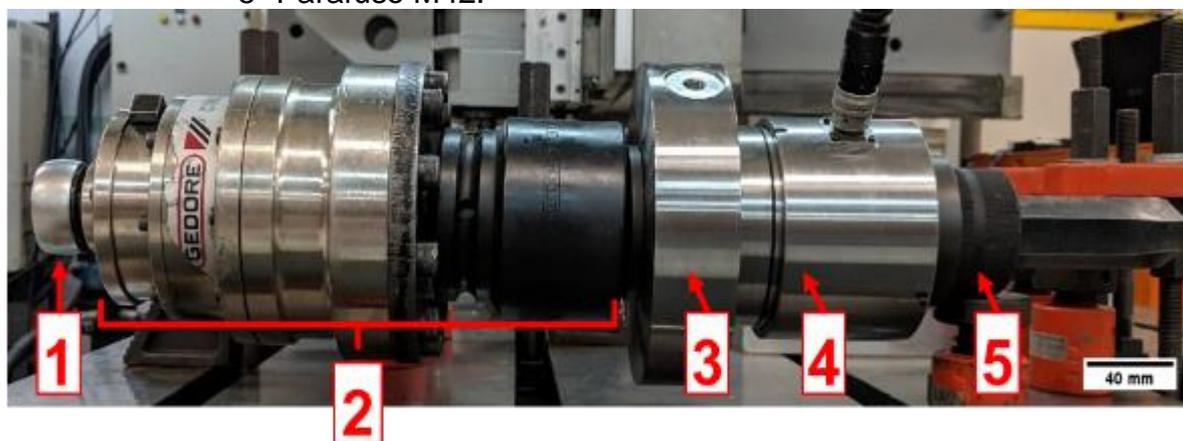
Fonte: O autor

## APÊNDICE A

A primeira versão do ensaio com carregamento combinado, mencionada no item 3.1, possuía componentes com dimensões que possibilitavam a utilização de um sistema de aperto porca/parafuso M42. Tal sistema exercia a força axial de compressão enquanto pressão hidrostática era aplicada, resultando no carregamento combinado. Para realização do aperto deste sistema foi utilizado um multiplicador de torque com fator de multiplicação de 1:25, da fabricante Gedore, modelo Dremoplus No: 16065 (8604-45RS). O parafuso utilizado possuía classe 12.9, podendo atingir uma carga de prova de até 870 kN e torque máximo de 6.727 N.m.

Os experimentos práticos foram executados nas dependências do LAMEF, unidade Embrapii, no interior de um bunker para aumentar a segurança durante os ensaios, a Figura 51 apresenta a montagem do sistema para realização do aperto (carregamento axial).

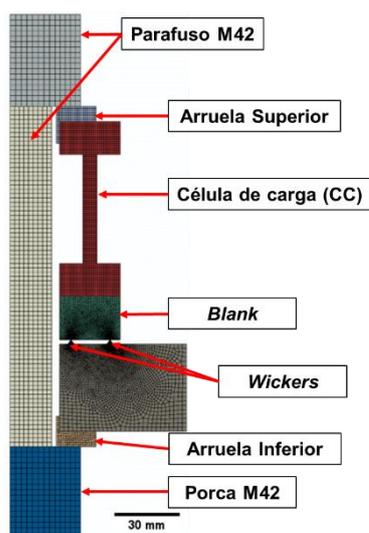
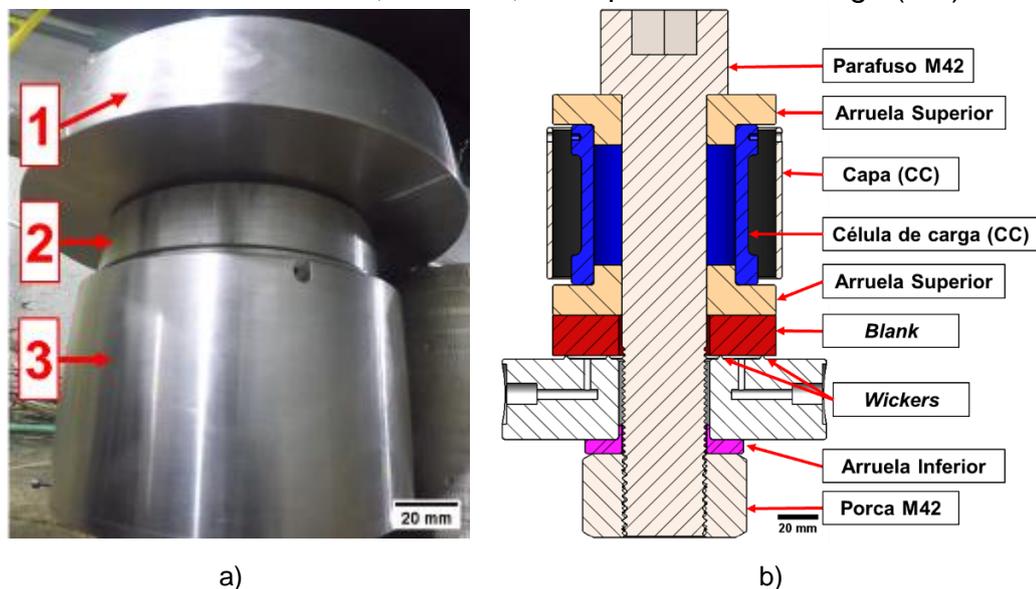
Figura 51 - Montagem do experimento e registro do aperto. 1- Torquímetro, 2- Multiplicador de torque, 3- CP wickers, 4- Célula de carga, 5- Parafuso M42.



Fonte: O autor

Após realizada a etapa de aperto, todo o conjunto foi inserido no interior de um *bunker* e aplicada pressão hidrostática. A Figura 52 apresenta os CPs durante a realização dos experimentos práticos (a), bem como a vista em corte da disposição dos componentes (b) e a exemplificação do modelo numérico desenvolvido (c).

Figura 52 - Experimentos práticos iniciais em escala reduzida: a) experimento prático, b) vista em corte dos componentes, c) exemplificação do modelo numérico. 1- wickers, 2- Blank, 3- Capa Célula de Carga (CC).



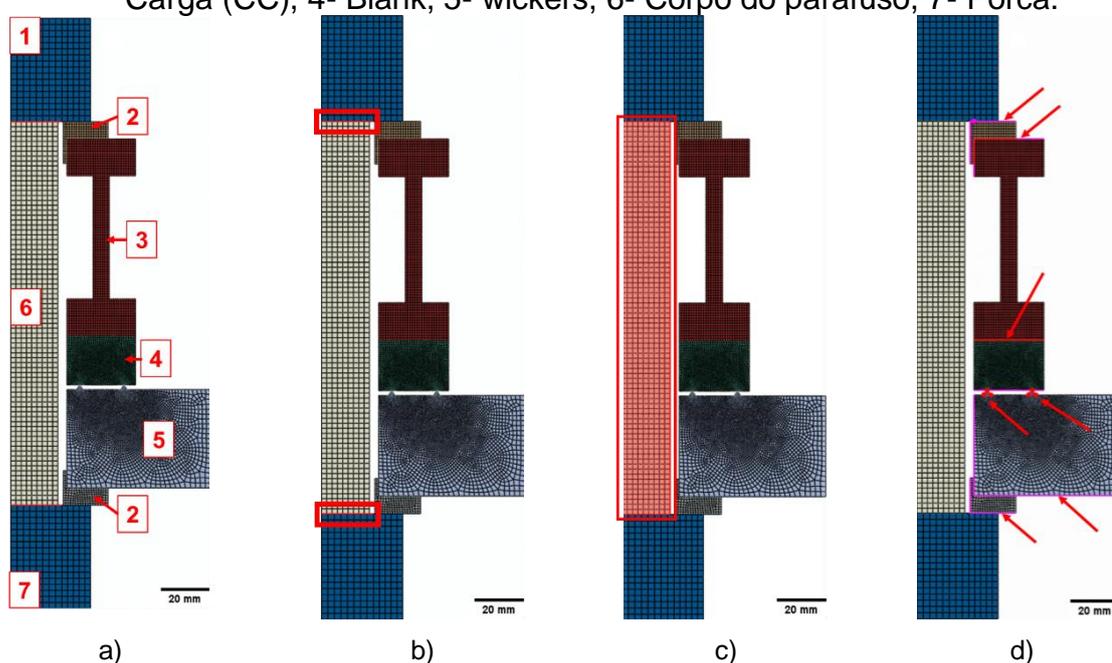
c)

Fonte: O autor

Com o objetivo de mensurar a pressão de contato dos *wickers* durante os experimentos, o ensaio em escala reduzida foi reproduzido numericamente. O modelo numérico gerado possibilitou calcular a pressão de contato entre os CPs em cada elemento de contato. Os resultados obtidos experimentalmente foram utilizados para posterior calibração do modelo numérico, ou seja, as leituras da célula de pressão, célula de carga e torque aplicado foram utilizadas para o aprimoramento do modelo.

As forças de aperto do parafuso foram representadas por uma deformação aplicada no elemento que configura tal componente. Ademais, as tensões da célula de carga do modelo numérico são as leituras das células de carga e de pressão após o aperto e pressurização da câmara, respectivamente. A Figura 53, é a representação da malha dessa modelagem numérica.

Figura 53 - Malha utilizadas no modelo numérico: a) componentes da montagem, b) condição de união entre *cabeça* ↔ *corpo do parafuso* e *corpo do parafuso* ↔ *porca*, c) deformação para representar a tensão do parafuso, d) superfícies de contato. 1- Cabeça do parafuso, 2- Arruela, 3- Célula de Carga (CC), 4- Blank, 5- wickers, 6- Corpo do parafuso, 7- Porca.



Fonte: O autor

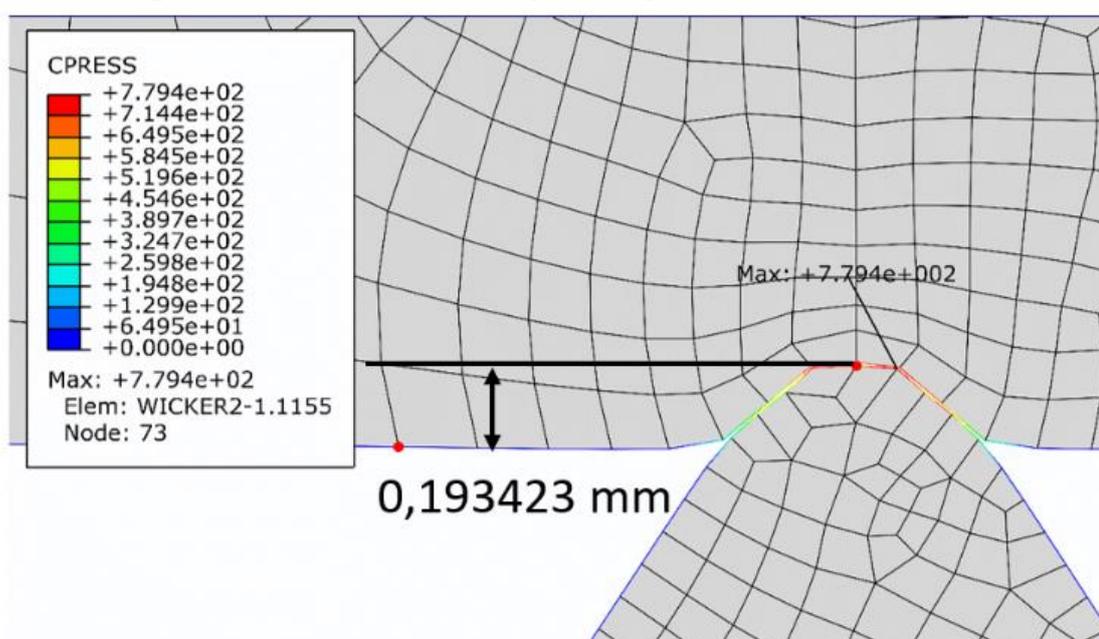
Conforme elucidado anteriormente, as forças alcançadas com essa metodologia experimental não foram suficientes para atingir pressões de contato próximas às encontradas em modelos numéricos, as quais representam equipamentos em escala real. Devido a esse fato, a metodologia foi reformulada para aplicação de carregamento axial por meio de atuador hidráulico. Os resultados obtidos com este experimento são apresentados na Tabela 18. O parâmetro de entrada é a força de aperto e as respostas são as forças de vazamento e pressão de vazamento.

Tabela 18 - Condições e respostas do ensaio experimental

Parâmetro	Valor
Força de aperto	422 kN
Força de vazamento	435 kN
Pressão de vazamento	9.181 PSI

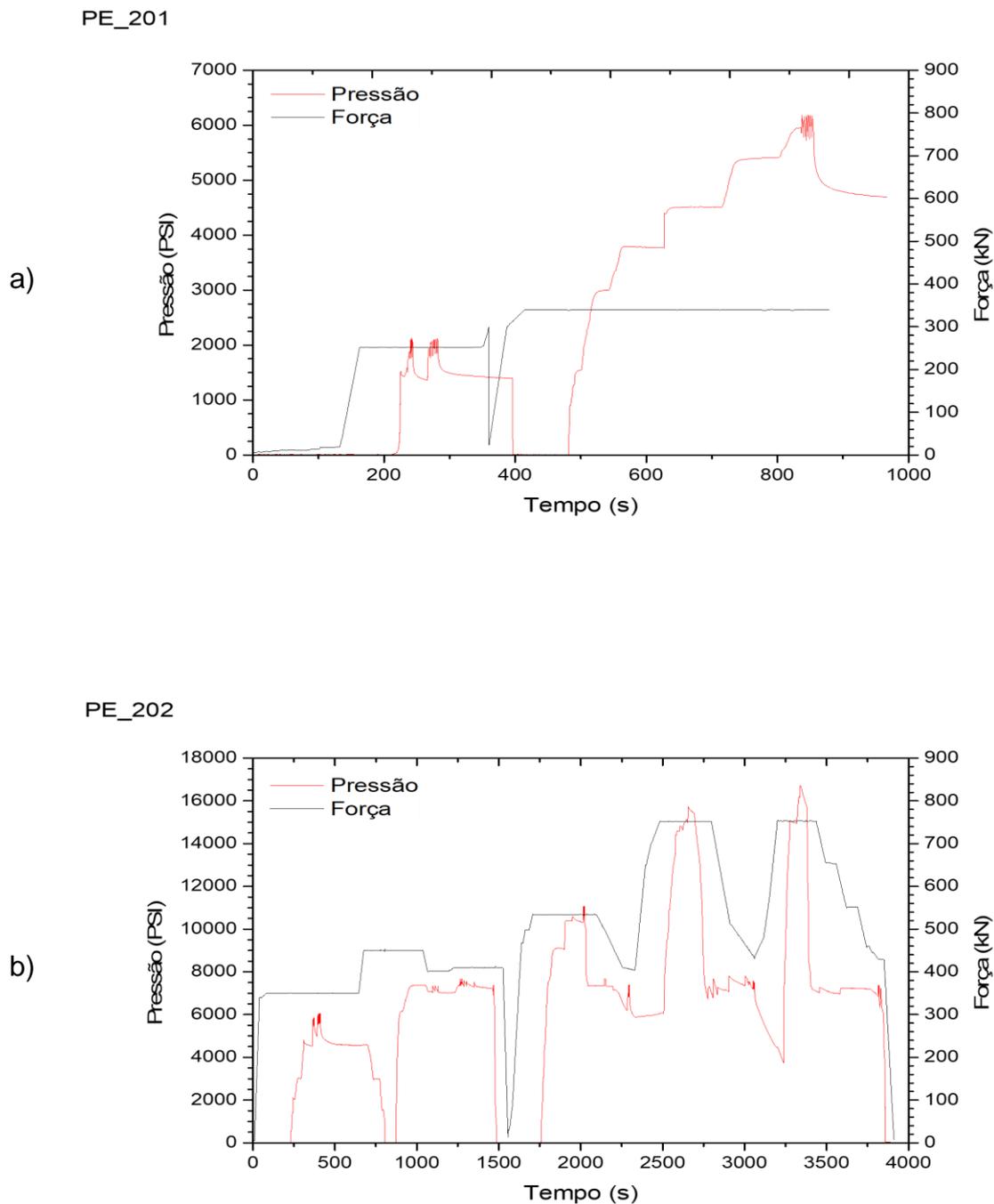
Os valores apresentados na Tabela 18 foram inseridos no modelo numérico e resultaram em uma profundidade de cravamento da ordem de 0,193423 mm, sendo insuficiente para alcançar pressões maiores. A Figura 54 apresenta esta profundidade representada em elementos finitos.

Figura 54 - Profundidade de penetração do modelo numérico

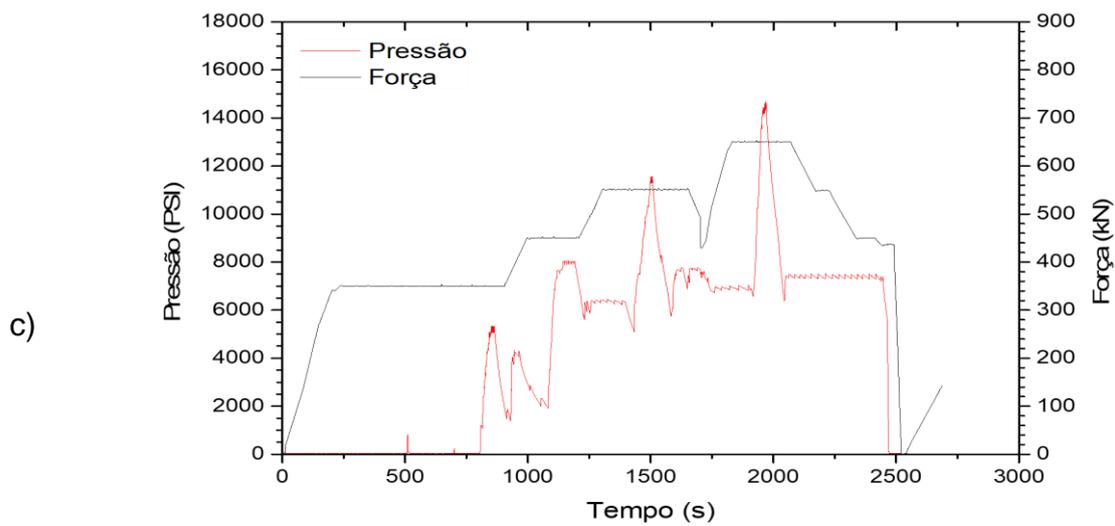


Fonte: O autor

## APÊNDICE B

Figura 55 - Gráfico de comando (Força, Pressão X Tempo) para 2 *wickers*: a) 201, b) 202, c) 203, d) 204

PE\_203



PE\_204

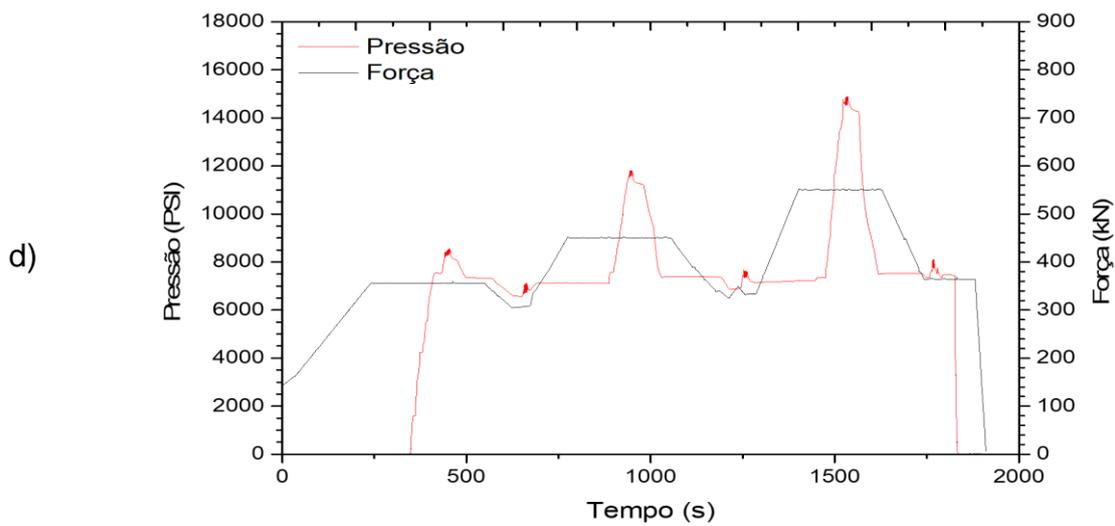
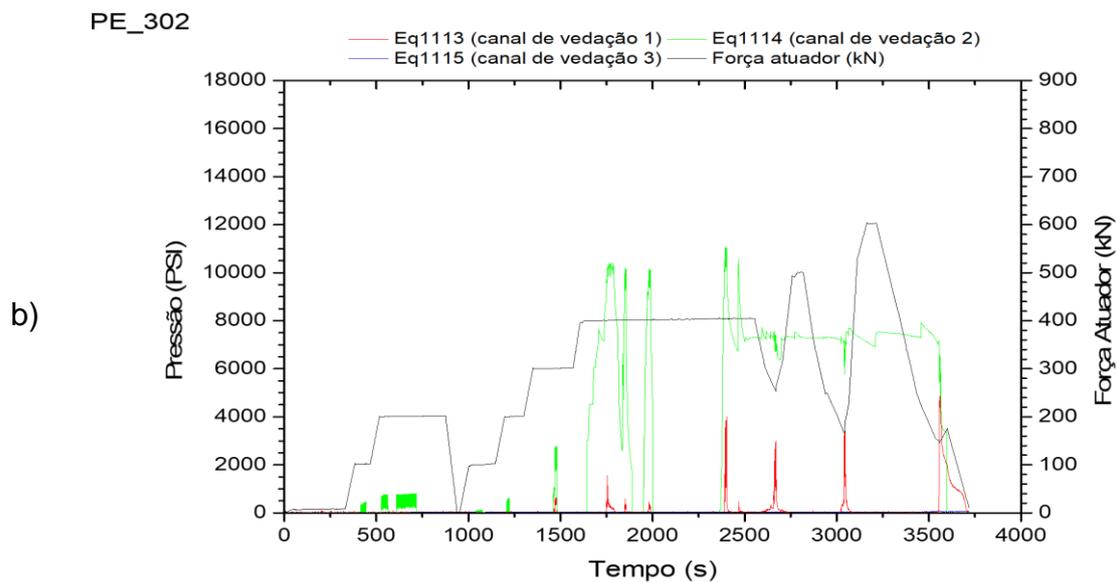
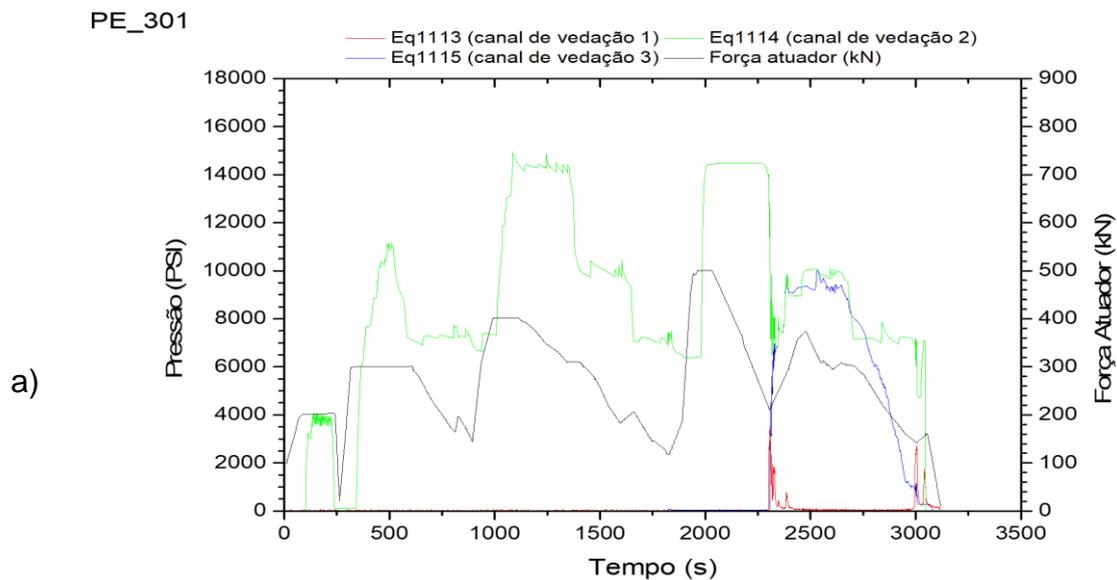
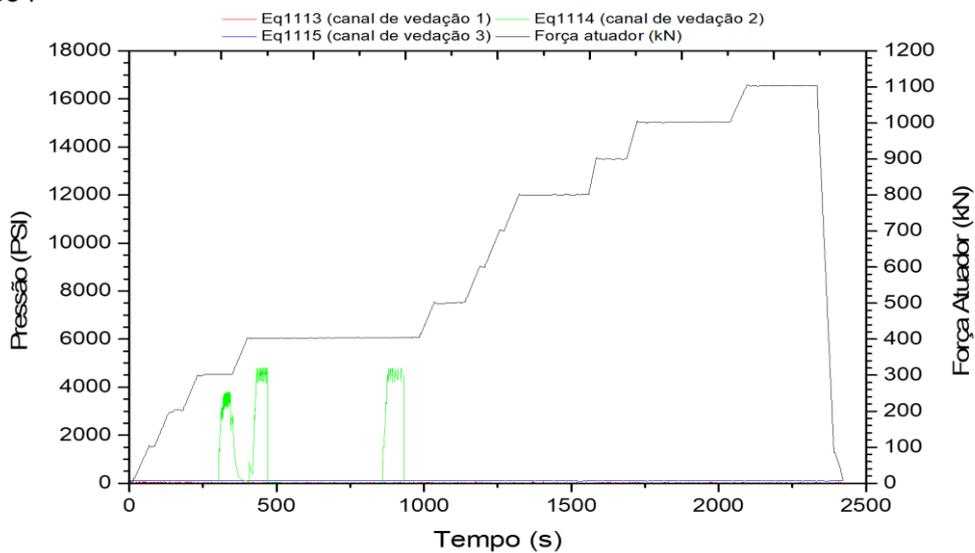


Figura 56 - Gráfico de comando (Força, Pressão X Tempo) para 4 *wickers*: a) 301, b) 302, c) 304, d) 305



PE\_304

c)



PE\_305

d)

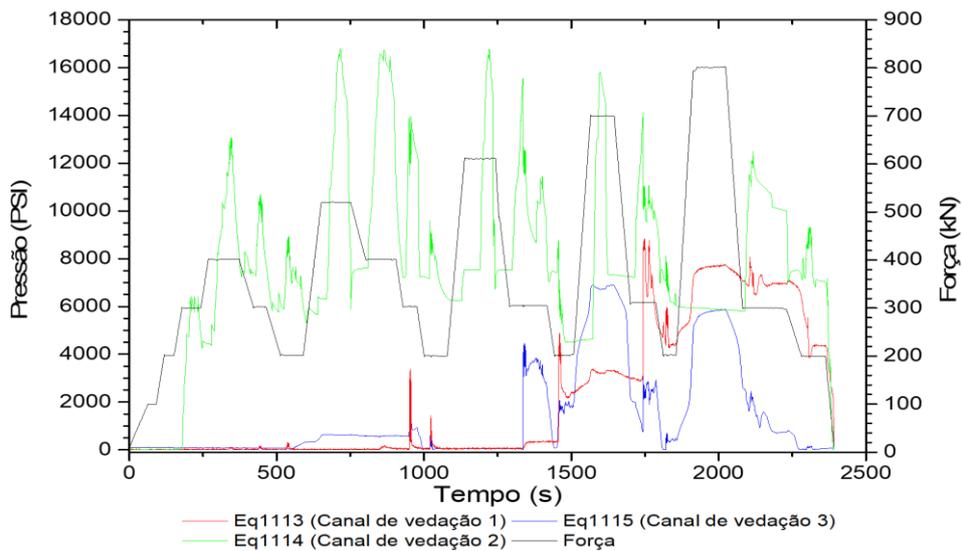
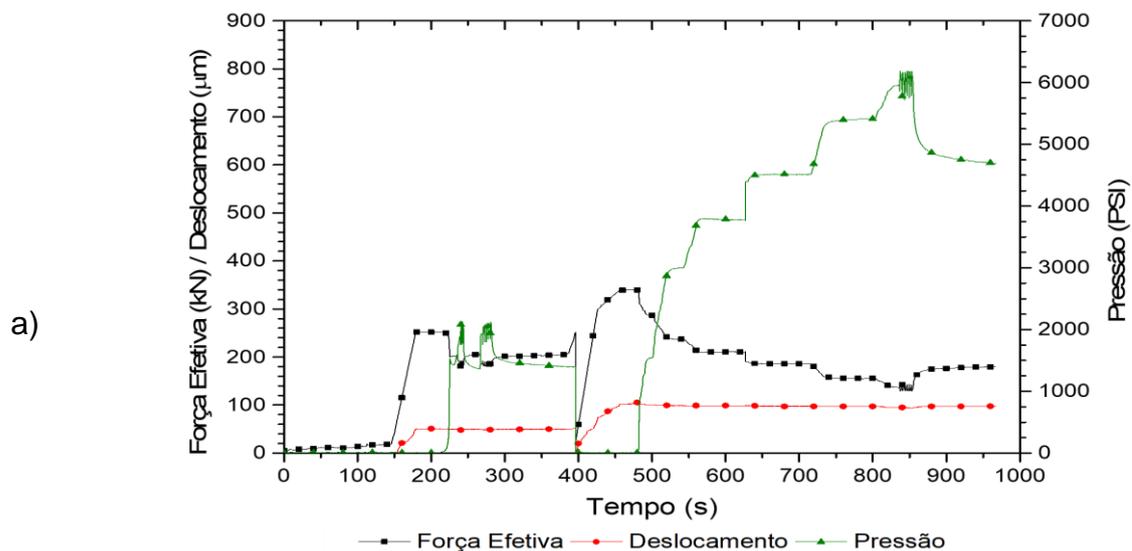
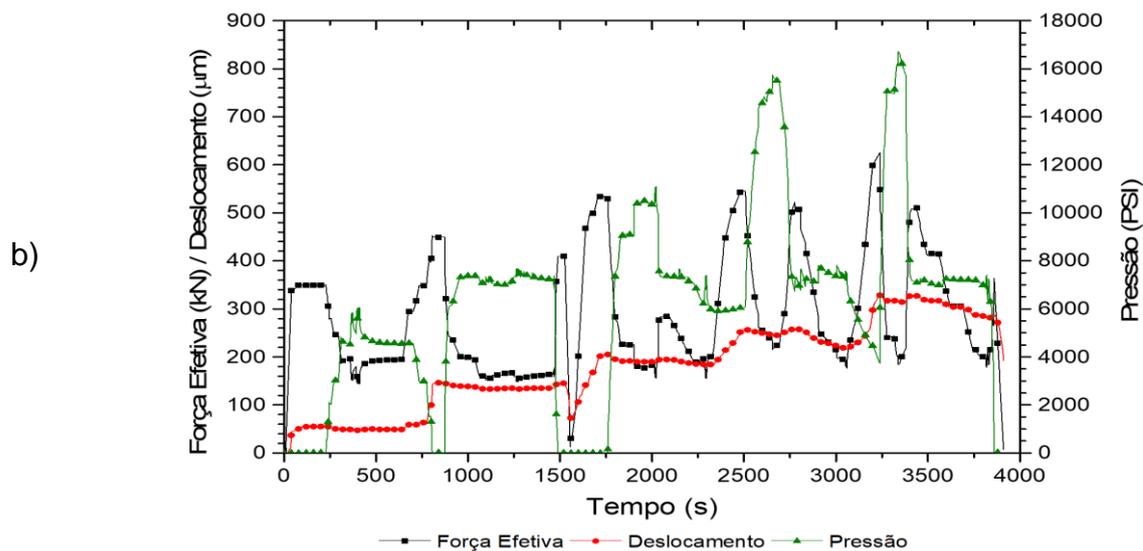


Figura 57 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) - 2 wickers: a) 201, b) 202, c) 203, d) 204

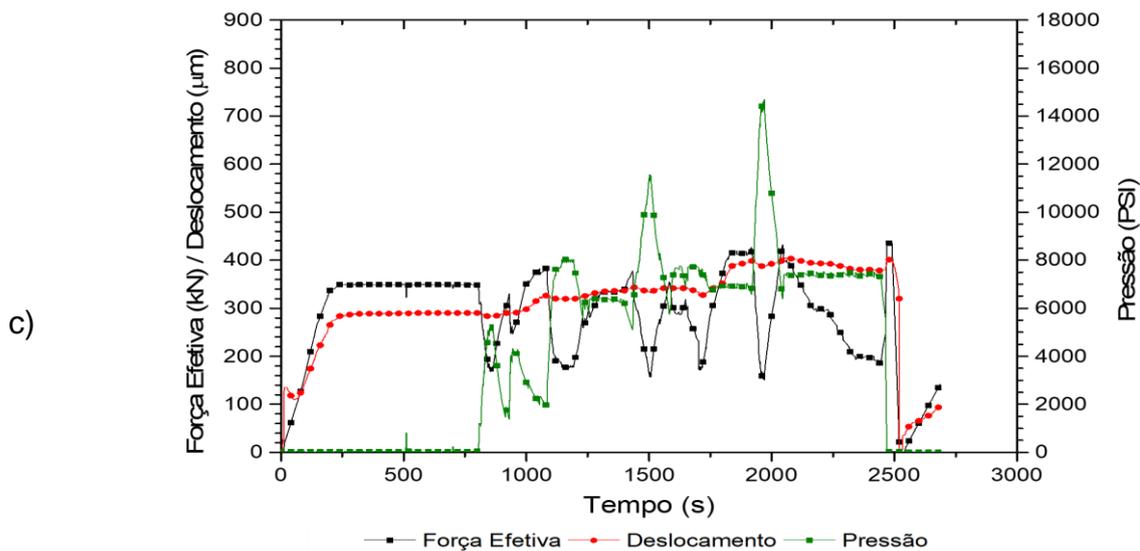
PE\_201



PE\_202



PE\_203



PE\_204

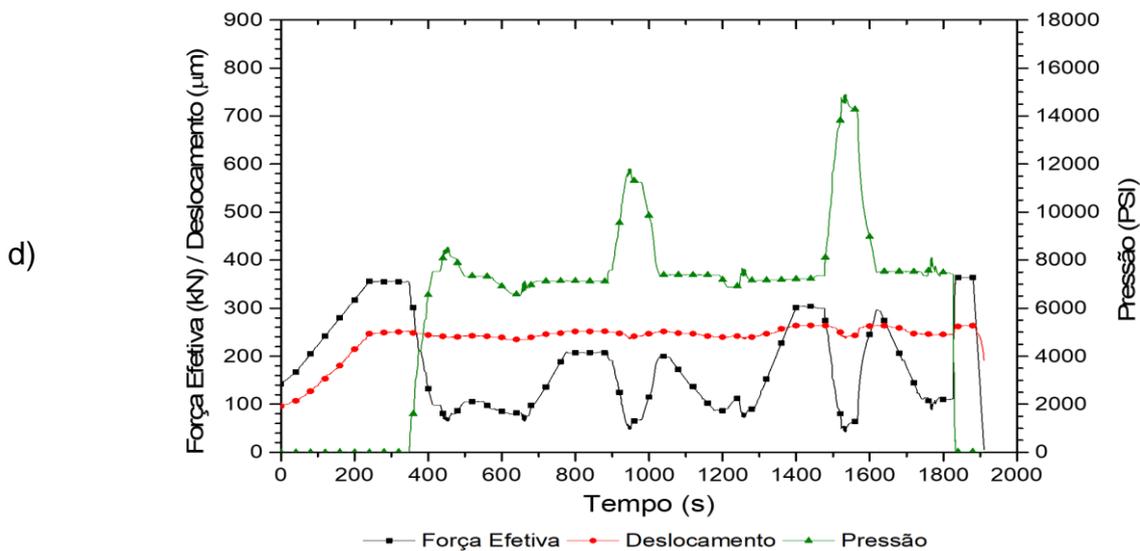
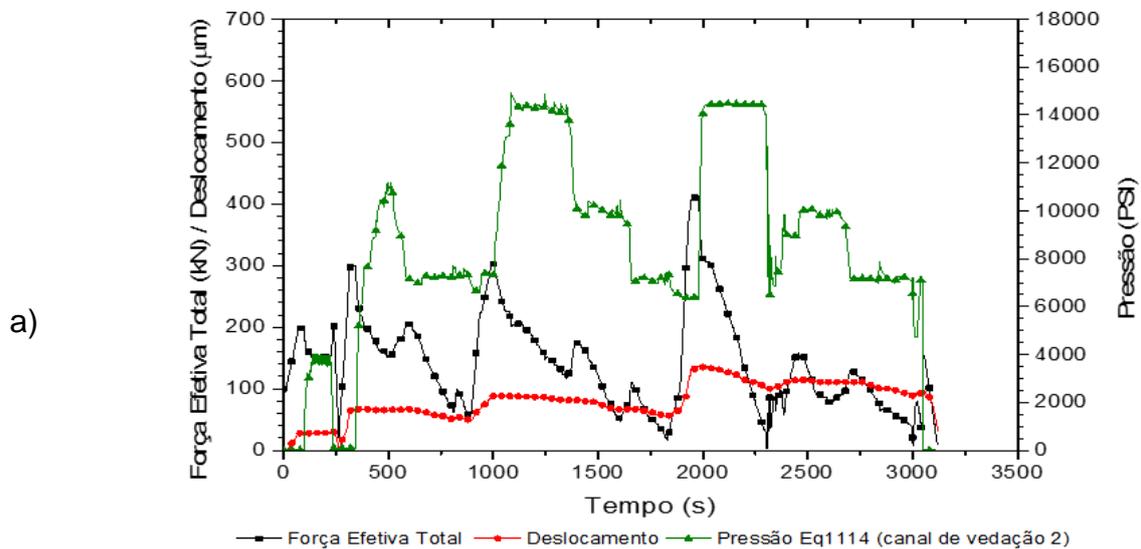
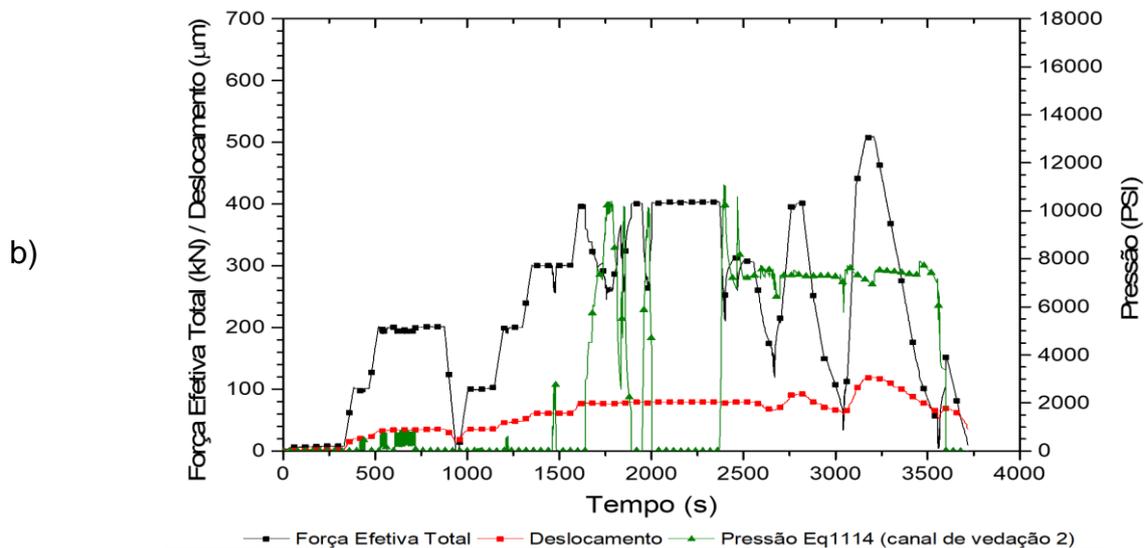


Figura 58 - Gráfico de resultado (Força Efetiva, Pressão, Deslocamento X Tempo) - 4 wickers: a) 301, b) 302, c) 304, d) 305

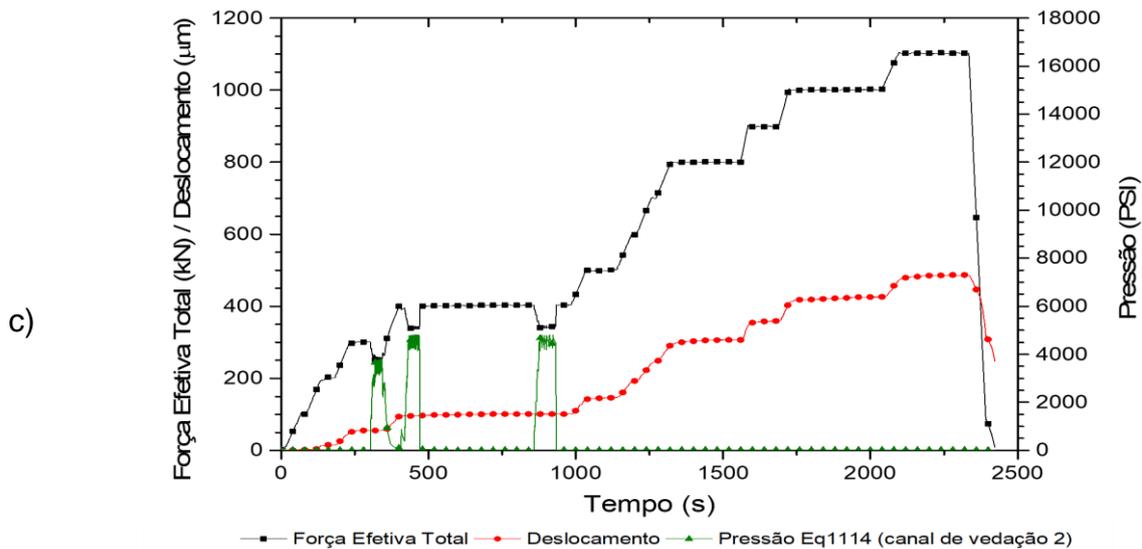
PE\_301



PE\_302



PE\_304



PE\_305

